



El- og varmeproduktionsteknologier

Schleisner, Liselotte

Publication date:
1990

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Schleisner, L. (1990). *El- og varmeproduktionsteknologier*. Risø National Laboratory. Risø-M No. 2877

General rights

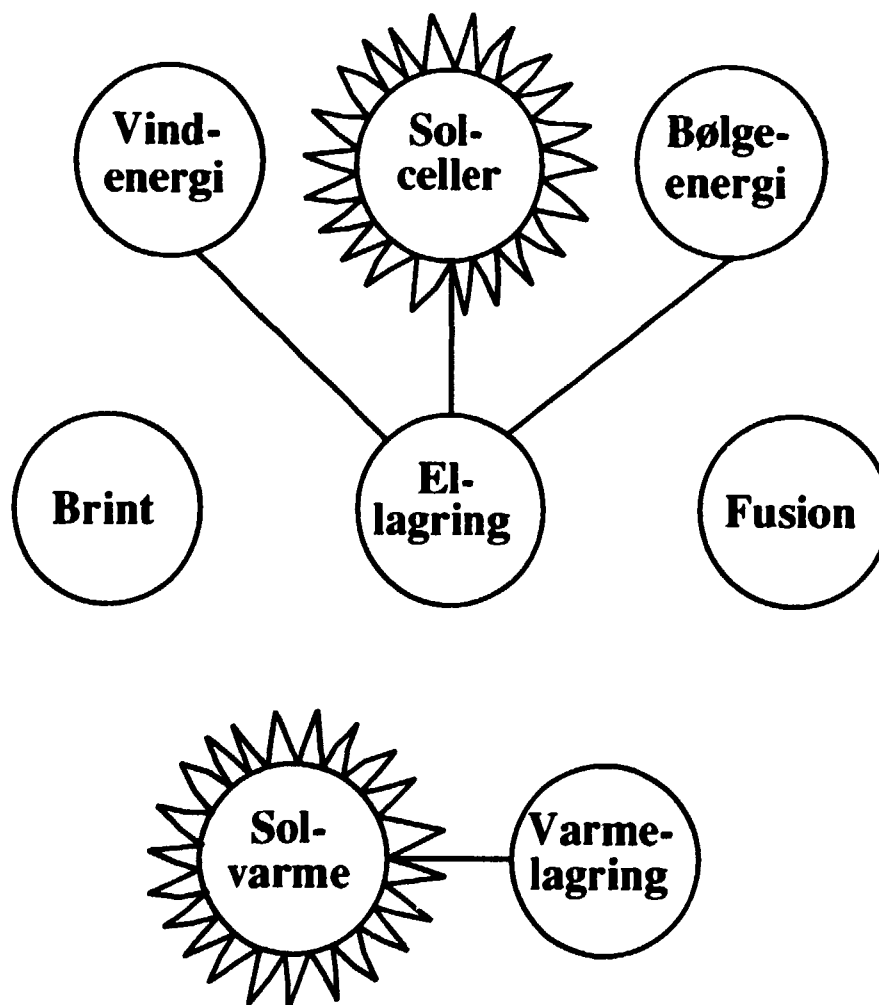
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

El- og varmeproduktions- teknologier

Lotte Schleisner



El- og varmeproduktions- teknologier

Risø-M-2877

Lotte Schleisner

**Afdelingen for Systemanalyse
Energisystemgruppen**

*Forskningscenter Risø, DK-4000 Roskilde, Danmark
Marts 1990*

1

RISØ-M-2877

EL- OG VARMEPRODUKTIONSTEKNOLOGIER

Lotte Schleisner

Afdelingen for Systemanalyse
Energisystemgruppen

Abstract. Nærværende rapport indeholder en teknisk vurdering over en del af de el- og varmeproduktionsteknologier, som forventes at kunne være til rådighed inden år 2030.

De i denne rapport beskrevne teknologier er primært vedvarende energikilder.

Udredningen er foranlediget af Energistyrelsen i forbindelse med udarbejdelsen af "ENERGI 2000- handlingsplan for en bæredygtig udvikling".

Rapporten har sammen med andre baggrundsrapporter dannet det tekniske og økonomiske grundlag for handlingsplanen og er således vedlagt ENERGI 2000 som baggrundsrapport nr. 4.

Marts 1990

Forskningscenter Risø, DK-4000 Roskilde, Danmark

**Projektet er udført for Energistyrelsen
(ENS-Journal nr. 83401-2)**

ISBN 87-550-1655-3

ISSN 0418-6435

Grafisk Service, Risø 1990

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
INDLEDNING	7
SAMMENFATNING	9
1. FUSION	14
1.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	14
1.2. Energiforhold	20
1.3. Miljøforhold	21
1.4. Økonomi	22
1.5. Konsekvensvurdering for det samlede elsystem ved benyttelse af fusion	24
1.6. Industripolitiske aspekter	25
1.7. Fremtidig forskning og udvikling	25
1.8. Datablad	26
2. VINDENERGI	27
2.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	27
2.2. Energiforhold	33
2.3. Miljøforhold	36
2.4. Økonomi	37
2.5. Konsekvensvurdering for det samlede elsystem ved benyttelse af vindenergi	40
2.6. Industripolitiske aspekter	41
2.7. Fremtidig forskning og udvikling	43
2.8. Datablad	45
3. SOLENERGI	46
3.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	46
3.2. Energiforhold	59
3.3. Miljøforhold	65
3.4. Økonomi	65
3.5. Konsekvensvurdering for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af solenergi	68
3.6. Industripolitiske aspekter	69

	Side
3.7. Fremtidig forskning og udvikling	71
3.8. Datablad	74
 4. BØLGEENERGI	 78
4.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	78
4.2. Energiforhold	84
4.3. Miljøforhold	85
4.4. Økonomi	85
4.5. Konsekvensvurdering for det samlede elsystem ved benyttelse af bølgeenergi	87
4.6. Industripolitiske aspekter	88
4.7. Fremtidig forskning og udvikling	89
4.8. Datablad	91
 5. VARMELAGRING	 93
5.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	93
5.2. Energiforhold	104
5.3. Miljøforhold	107
5.4. Økonomi	110
5.5. Konsekvensvurdering for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af varmelagring	111
5.6. Industripolitiske aspekter	112
5.7. Fremtidig forskning og udvikling	113
5.8. Datablad	116
 6. ELLAGRING	 117
6.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	118
6.2. Energiforhold	136
6.3. Miljøforhold	141
6.4. Økonomi	142
6.5. Konsekvensvurdering for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af ellagring	145
6.6. Industripolitiske aspekter	147
6.7. Fremtidig forskning og udvikling	147
6.8. Datablad	149

	Side
7. BRINTTEKNOLOGI	150
7.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering ..	150
7.2. Energiforhold	155
7.3. Miljøforhold	159
7.4. Økonomi	161
7.5. Konsekvenser for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af brint som energibærer	164
7.6. Industripolitiske aspekter	164
7.7. Fremtidig forskning og udvikling	165
7.8. Datablad	167
REFERENCELISTE	168

INDLEDNING

I forbindelse med udarbejdelsen af Brundtland-handlingsplanen på energiområdet er der foretaget en sammenfatning og vurdering af forskellige el- og varmeproduktionsteknologier.

Følgende teknologier er behandlet i nærværende rapport:

- fusion
- vindenergi
- solenergi
- bølgeenergi
- varmelagring
- ellagring
- brintteknologi.

Hver teknologi starter med en beskrivelse af den teknologiske udvikling på området, samt en vurdering af teknologien i kommercielt henseende på kort sigt (år 2000), på mellemlang sigt (år 2015) og på lang sigt (år 2030) for så vidt det har været muligt. Teknologien er herefter belyst set ud fra en energi- og miljømæssig samt økonomisk synsvinkel. Priserne, der indgår i rapporten, er 1989-priser, medmindre andet er oplyst. Konsekvenser for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af de behandlede teknologier er herefter belyst. Ligeledes behandles de industripolitiske aspekter for den danske industri i forbindelse med teknologien. Endelig vurderes, hvilke forsknings- og udviklingsinitiativer der bør igangsættes inden for hver teknologi for at fremme udviklingen.

Visse af de beskrevne teknologier afsluttes med et datablad til benyttelse i en overordnet scenariemodell. Databladet indeholder energimæssige, tekniske, økonomiske og miljømæssige karakteristika for situationen i dag samt for årene 2000, 2015 og 2030. De benyttede statusdata er hentet fra den til hver teknologi hørende beskrivelse. Data for teknologien, som den ser ud i dag, er i de fleste tilfælde rimeligt fastlagte, men de fremtidige

data er forbundet med en del usikkerhed, hvilket fremgår af de enkelte datablade.

Det må bemærkes, at en del af teknologierne endnu ikke er kommercielt anvendte teknologier. Beskrivelserne er derfor foretaget ud fra udviklingen på verdensplan og ikke kun i Danmark.

Rapporten er udarbejdet som led i videnopbygning vedrørende el- og varmeproduktionsteknologier for Energistyrelsen som bistand til udarbejdelse af regeringens Brundtland-handlingsplan på energiområdet.

1. udgave af rapporten har indgået i en høringsrunde, og der er herunder modtaget kommentarer fra Energistyrelsen, Elkraft/Elsam, Danske Fjernvarmeværkers Forening, Miljøstyrelsen samt Laboratoriet for Varveisolering (Danmarks Tekniske Højskole). De fremkomne kommentarer er taget i betragtning under udarbejdelsen af nærværende udgave af rapporten.

Rapporten er udarbejdet i Energisystemgruppen på Risø på baggrund af oplysninger og materiale fra relevante personer vedrørende de enkelte teknologier.

Fra Risø har følgende personer bidraget med oplysninger til rapporten:

Poul P. Michelsen
Peter Hjuler Jensen
Per Harvøe
Mogens Mogensen
Niels Hessel Andersen

Efter udarbejdelse af første udgave af rapporten er Risø blevet pålagt at behandle brintteknologien, og dette arbejde har Peter Skjerk Christensen og Helge V. Larsen deltaget i.

SAMMENFATNING

I foråret 1990 vil regeringen fremlægge en energihandlingsplan med det formål at nedsætte såvel energiforbruget som den deraf følgende forurening. I denne forbindelse er nærværende rapport udarbejdet. Rapporten beskriver udviklingen indtil i dag for forskellige teknologier, som anvendes i forbindelse med produktion af el og varme, samt vurderer deres udvikling frem til år 2030.

De fleste teknologier, der er behandlet i denne rapport, er nye teknologier, og den fremtidige udvikling er derfor især for disse meget vanskelig at vurdere. Et fællespunkt for teknologierne er, at ingen af dem kræver en forbrænding med deraf følgende emission. Teknologierne er således ikke luftforurenende, tværtimod vil flere kunne nedsætte den samlede forurening. Teknologierne kan dog medføre andre miljømæssige problemer.

Ud af de beskrevne teknologier er der fire, som baseres på vedvarende energikilder, nemlig én varmeproducerende: sol, og tre elproducerende: sol, vind og bølger. Disse kilder er attraktive set ud fra såvel et energimæssigt som et miljømæssigt synspunkt. Desuden behandles teknologier, som vedrører lagring af energi i form af varme, el og i kemisk bundet form (brint). Derudover omtales fusion.

I det følgende summeres, hvilke af de beskrevne teknologier, der kan forventes at kunne bidrage til energiforsyningen i år 2030. Selvom en energiprognose for år 2030 forelå, har det ikke været hensigten her at angive, hvor stor en del af det samlede energiforbrug i år 2030 de omtalte teknologier er i stand til at dække. Derimod kan den mængde energi, som de respektive teknologier kan forventes at kunne producere i Danmark i år 2030, estimeres.

Fusion er en teknologi, der endnu er på forsknings- og udviklingsniveau, og forventes ikke at være kommerciel inden år 2030.

Fusion forventes derfor ikke at kunne bidrage til den samlede energiforsyning i Danmark inden for denne årssække.

Udnyttelse af vindenergien sker i dag med kendt teknologi. Omkring 1,5% af Danmarks elforbrug dækkes i dag af vindmøller. Udviklingen indenfor vindmølleområdet vurderes at gå mod større vindmøller samt havplacerede vindmøller, da det kan være svært at finde egnede placeringer til vindmøller på land.

I år 2000 forventes 10% af Danmarks nuværende elforbrug at kunne dækkes af vindkraft. Et positivt aspekt ved vindkraften er det store eksportpotentiale og dermed bidrag til samfundsøkonomien.

En afgørende forudsætning for, at solvarmecentraler kan blive et attraktivt supplement til energiforsyningen i Danmark, er, at solvarmen kan lagres fra sommer til vinter, idet benyttelsestiden og dermed de økonomiske fordele derved stiger.

Lavtemperaturdrift i varmesystemet er ligeledes væsentligt for solvarmens udvikling, idet en solfangers ydelse pr. m^2 afhænger af temperaturen i det varmesystem, der leveres energi til. Således kan ydelsen næsten fordobles, hvis returtemperaturen i varmesystemet kan nedsættes fra 65°C til 30°C.

Anlægsinvesteringen i solvarmecentraler forventes at falde drastisk fra 11,3 kr./kWh pr. år i 1988 uden varmelager til 2 kr./kWh pr. år i år 2030 med lager tilkoblet.

Udviklingen indenfor varmelagring er rettet mod udvikling af billigere varmelagre, men varmelagringen synes allerede i dag at være på et kommercielt stade. Således vil damvarmelagre nu kunne indgå i energisystemet, men udviklingen vil på mellemlang sigt gå mod at benytte borehulslagre og aquiferlagre. Aquiferlagre er de økonomisk mest attraktive lagre, men specielt ved høje temperaturer er der endnu problemer med drift af disse lagre.

Solceller er en elteknologi, som der specielt i USA har været forsket intensivt i. Energiforbruget er i dag for højt, men den for-

ventes at komme ned i et fornuftigt leje. Bliver dette tilfældet, vil en mindre del af Danmarks elbehov kunne dækkes af solceller.

Bølgeenergi er en teknologi, der er på forsøgsstadiet i Danmark. Med de store energimængder, der forekommer i bølger i danske farvande, er det en teknologi, der på længere sigt kunne blive uhyre interessant. Således vil udlægning af en 170 km strækning med 420 kW-bølgemaskiner i de danske farvande, specielt Nordsøen, kunne producere ca. 20% af det danske elforbrug i dag. Dette forudsætter dog, at bølgeenergimaskinerne kan opnå en virkningsgrad på 30%, hvilket absolut forventes at være tilfældet omkring år 2030. Energiprisen forventes at nå ned på 40 øre/kWh.

Den ovenfor nævnte elproduktion bliver produceret, når vinden blæser gunstigt i forhold til maskinernes placering, og udnyttelse af denne energimængde forudsætter derfor lagringsmuligheder for elektriciteten.

Forskellige former for ellagre kan være aktuelle under danske forhold. Muligheden for placering af pumpekraftværker i Danmark er blevet undersøgt, og efter alt at dømme vil det kunne være realistisk at etablere 2 pumpekraftværker i Danmark, der benytter havet som nedre magasin. Disse vil kunne være aktuelle i forbindelse med udnyttelse af bølgeenergi og vil på årsbasis kunne "flytte" omkring 1/6 af den ovenfor nævnte elenergi produceret af bølger. Pumpekraftværkerne er dog meget pladskrævende.

Superledende magnetiske energilagre har meget høj effektivitet og en hurtig omkoblingstid, og de er derfor uhyre attraktive som energilagre til elnettet. Forventningerne til disse lagre er store, og man regner med, at de omkring år 2000 vil kunne indgå i elnettet i USA. Hvorvidt de kan benyttes i Danmark inden år 2030, er endnu uvist. Alt tyder på, at det bliver store lagre, evt. for store til at kunne udnyttes økonomisk udelukkende i det danske elsystem.

Lagring af el i batterier er i dag muligt i mindre mængder. Store batterilagre ligger af økonomiske grunde formentlig langt ude i fremtiden.

Brint som energibærer kan på længere sigt få en betydning som afløsning/supplement til naturgassen, især hvis man under danske forhold tænker sig den fremstillet ved elektrolyse på grundlag af elektricitet produceret med vedvarende energi som beskrevet i det foregående. Hertil kommer brintens mulighed for lagring, som også har betydning for en effektiv udnyttelse af store mængder vedvarende energi, når produktionen kommer uforudsigeligt, som f.eks. vindkraft.

En forudsætning, for at ovenstående udvikling af de forskellige teknologier kan finde sted, er, at der satses på forskning og udvikling i såvel statslig som privat regi. For Danmark bør der på mellemlangt sigt specielt forekomme yderligere forskning og udvikling indenfor bølgeenergi samt videreudvikling af solcentraler og vindenergi. Derudover bør der ske en videreudvikling inden for lagringsområdet for således at opnå energibesparelser og deraf følgende miljøforbedringer.

For alle de i denne rapport nævnte teknikker gælder, at de stort set ikke bidrager med emission, hvilket fremgår af nedenstående tabel.

	CO ₂	SO ₂	NO _x	Bemærkninger
Fusion	0	0	0	
Vindkraft	0	0	0	
Solenergi	0	0	0	
Bølgeenergi	0	0	0	
Varmelagring	0	0	0	
Ellagring	(0)	(0)	(0)	Trykluftlagring kan medføre emission.
Brint	(0)	(0)	(0)	Fremstilling af H ₂ ud fra kul medfører SO ₂ /NO _x . Afbrænding af H ₂ medfører kun NO _x .

Nedenfor angives energiprisen pr. kWh i dag for de respektive energikilder.

Fusion	: 0,3 - 0,7 kr./kWh	(teoretisk)
Vindkraft	: 0,33 - 0,43 kr./kWh	
Solvarme	: 0,3 kr./kWh	
Solceller	: 1,6 kr./kWh	
Bølgeenergi	: 0,6 kr./kWh	(teoretisk)
Varmelagring	: 0,06 - 0,45 kr./kWh	(kun for lagring)
Ellagring	: 0,18 - 955 kr./kWh	(kun for lagring)
Brint (elektrolyse):	0,24 kr./kWh	(kun konvertering)

Som det fremgår, kræver energiprisen pr. kWh produceret ved solceller reduktion, før solceller vil kunne indgå i energisystemet.

Energiprisen pr. lagret kWh ved benyttelse af ellagre varierer meget afhængig af ellagrene. Ni/Cd batterierne er endnu den dyreste form for ellagring, og en kraftig prisreduktion er her nødvendig, før batterierne bliver økonomiske.

De øvrige angivede energikilder er i dag nede i et økonomisk fornuftigt leje, men energiprisen pr. kWh forventes at falde yderligere i løbet af de kommende år.

1. FUSION

1.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering

Et plasma er en gas af ladede partikler, d.v.s. en blanding af elektroner og ioner. Plasma kan dannes ved opvarmning af en almindelig gas af neutrale partikler. Når temperaturen er blevet tilstrækkelig høj, i praksis nogle få tusinde grader, er de termiske hastigheder så store, at sammenstød mellem neutrale partikler bevirker, at de ioniseres, og gassen omdannes til et plasma. Plasmatilstanden kan således opfattes som den fjerde tilstandsform i rækken: fast stof, væske, gas, plasma. I naturen er der plasma i de ioniserede lag omkring jorden, i solen og dens korona og i meget større mængder i det interstellare rum. Ca. 99% af alt stof i universet er i plasmatilstanden. Kunstigt fremstillede plasmaer findes f.eks. i lysstofrør, i svejsebuer og i forskellige laboratorieplasmaer.

Det er kun ca. 50 år siden, man for alvor begyndte at interessere sig for plasmaers fysik. Incitamentet var bl.a. et ønske om at forstå radiobølgers vekselvirkning med ionosfæren.

I midten af 50'erne steg interessen for plasmafysik meget stærkt. Baggrunden herfor var ønsket om at udvikle en fusionsreaktor. I denne reaktor vil man udnytte, at fusionsenergi frigøres, når lette atomkerner smelter sammen, d.v.s. når de fusionerer.

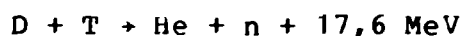
De store mængder energi, som dannes i solens indre, frembringes ved fusion af brint.

Fusionsprocessen er i princippet meget enkel: To lette atomkerner bringes til at kollideres og smelte sammen til en tungere atomkerne. Vægten af den sammensmeltede kerne vil være lidt mindre end summen af vægtene af de to kolliderede atomkerner. Ved anvendelse af Einsteins formel $E=mc^2$, hvor m =massetabet og c =lyshastigheden, kan den frigjorte energi E bestemmes. For at

sammensmeltningen skal kunne finde sted, skal atomkerner kolliderede med høj hastighed eller, hvad der er det samme, have meget høj temperatur, i praksis mange millioner grader.

Fusionsprocessen er i princippet det modsatte af fissionsprocessen, der udnyttes i traditionelle kernekraftværker - hvor tunge kerner spaltes i lettere kerner, hvis samlede vægt igen er mindre end udgangskernen, hvorved der også i denne proces frigives energi.

Der er mange mulige fusionsprocesser, der i princippet vil kunne udnyttes i en fusionsreaktor. Den der forekommer lettest at benytte, og som sandsynligvis vil blive benyttet i første generation af fusionsreaktorer, er:



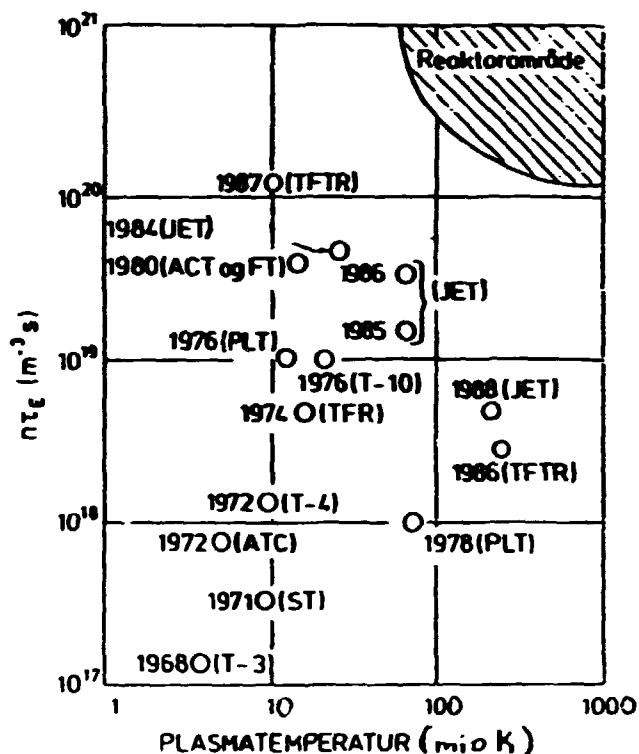
Hvilket vil sige en sammensmeltning af deuterium (D) og tritium (T), der derved bliver til helium (He) samt en neutron (n). De 17,6 MeV er et mål for den energi, der bliver frigjort ved processen.

Da tritium er ustabilt med en halveringstid på ca. 13 år, findes det ikke i naturen, men må dannes i selve fusionsreaktoren ved neutronbestråling af lithium (Li), der derved omdannes til He + T.

Ved de høje temperaturer, der kræves for at få fusionsprocessen til at fungere, vil fusionsbrændstoffet ikke blot være forgaset, men desuden være i plasmatilstand.

For at sikre at tilstrækkelig mange af D- og T-kernerne ved kollision undergår fusion, må plasmaet holdes sammen i en vis tid (τ_E) og plasmatætheden (n) må gøres tilstrækkelig høj. Plasma-tæthed gange sammenholdstid, ($n \cdot \tau_E$), kaldet indeslutningseffektiviteten, er en vigtig parameter ved vurderingen af fusionsprocessen. En anden vigtig parameter er temperaturen. Som illustreret på figur 1.1 kan en fusionsproces med positiv energi-

balance kun finde sted, hvis både $(n \cdot \tau_E)$ og temperaturen er tilstrækkeligt høje.



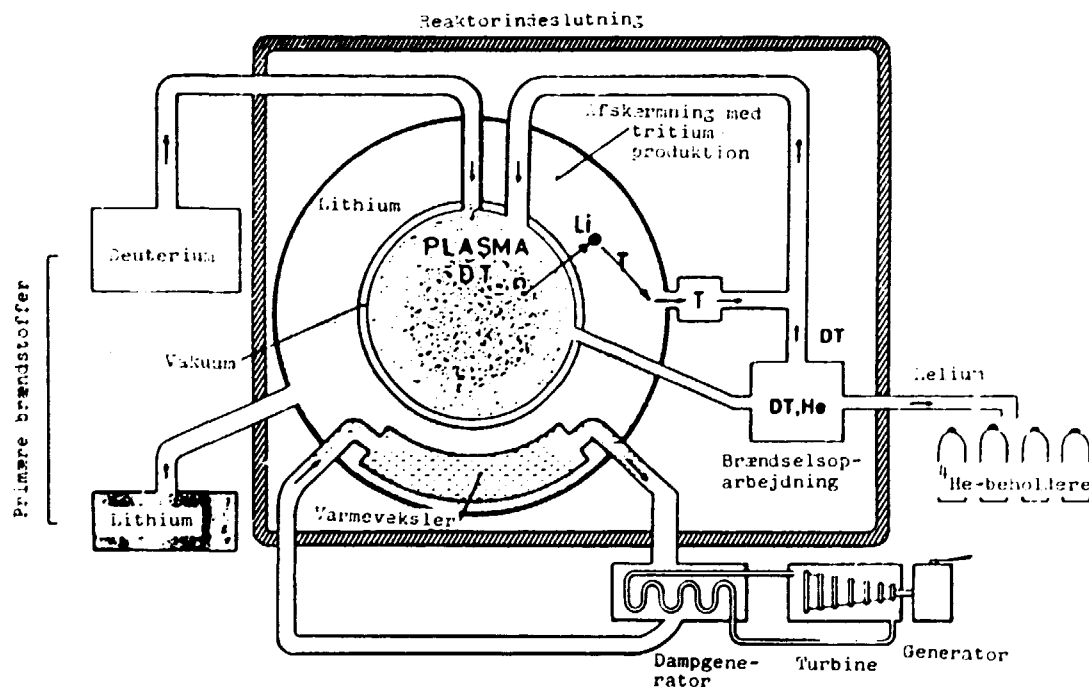
Figur 1.1. Plasmatemperatur versus indeslutningseffektivitet

Problemet med at holde plasmaet sammen i tilstrækkelig lang tid forsøger man i de fleste fusionseksperimenter at løse ved at fastholde plasmaet med stærke magnetfelter. Et magnetfelt er ikke nogen ideel beholder, men det forhindrer, at plasmaet mister for meget energi ved vekselvirkning med indeslutningsbeholderen. Den mest lovende form af denne type eksperimenter er den såkaldte TOKAMAK. Denne er da også grundlaget for det store fælleseuropæiske projekt JET, der er opbygget i England. En tokamak er et ringformet kammer, hvori plasmaet befinder sig, omgivet af magnetpoler, og opbygget som en transformator, således at man kan transformere elektrisk strøm til plasmæringen. Dermed kan man både stabilisere og opvarme plasmaet.

Endnu kan man ikke bygge en energiproducerende fusionsreaktor, men der udføres et meget stort forskningsarbejde, der er rettet mod dette mål. Når det engang lykkes, har menneskeheden en uud-

tømmelig energikilde til rådighed. Brændstoffet deuterium kan udvindes i meget store mængder fra almindeligt vand, og tritium vil kunne fremstilles i fusionsreaktoren ud fra grundstoffet lithium, der også findes i store mængder i naturen.

En almindelig forbrændingsproces startes ved, at brændstoffet, kul eller olie, opvarmes i en iltoldig atmosfære. Jo højere temperaturen bliver, jo flere forbrændingsprocesser sker der, fordi de termiske bevægelser bringer flere og flere ilt- og kulstofatomer tilstrækkeligt sammen til, at de kan danne CO_2 og derved producere varme. Når temperaturen er tilstrækkelig høj, antændes blandingen, d.v.s. processerne forløber ved hjælp af den varme, de danner; der behøves ikke yderligere varme udefra. Antændelsestemperaturen for almindelige forbrændingsprocesser ligger omkring 1000 K.



Figur 1.2. Principtegning af fusionskraftværk

En fusionsreaktor vil komme til at fungere efter et lignende princip. Fusionsbrændstoffet, der er en gasformig blanding af deuterium og tritium, opvarmes i en beholder. Når temperaturen er tilstrækkelig høj, har de enkelte partikler termisk energi nok til at fusionere, når de støder sammen. Problemet er, at to kerner skal meget tæt sammen, før de fusionerer, og at det er meget svært at bringe to kerner med positiv ladning så tæt sammen på grund af kernerens elektriske frastødning. Det kan beregnes, at en D-T-blanding først antændes ved ca. 100 mio.K, d.v.s. brændstoffet i en fusionsreaktor vil være i plasmatilstanden.

Fusionsforskningens to største plasmafysiske problemer er:

- 1) at opvarme plasmaet til de nødvendige ca. 100 mio.K.
- 2) at holde det passende isoleret fra den omgivende beholders vægge for at undgå afkøling og dermed, at fusionsprocesserne ophører.

Dertil kommer en række materialeteknologiske problemer, der omtales senere.

Plasmaet vil blive fastholdt i beholderen ved hjælp af et magnetfelt, således at det kommer i mindst mulig kontakt med beholdervæggene.

Ved de største fusionseksperimenter har man nu opnået temperaturer langt over 100 mio.K. Magnetfeltets evne til at holde plasmaet indesluttet er imidlertid endnu så ringe, at processerne kun kan forløbe meget kort tid, hvorfor energiproduktionen fra fusionsprocesserne har været ubetydelig.

Der undersøges forskellige metoder til at bringe plasmatemperaturen op til de nødvendige ca. 100 mio. K-grader. For det første kan plasmaet opvarmes af en plasmastrøm, der genereres af en transformer. Strømopvarmning kan imidlertid kun opvarme et tokamakplasma til nogle få mio. grader. Der må benyttes supplerende opvarmningsmetoder. Den metode, der hidtil har givet de højeste

temperaturer, benytter injektion af højenergetiske (ca. 100 keV) neutrale partikler ind i plasmaet. De neutrale partikler ioniseres ved stød i plasmaet, hvorefter de holdes indfanget i magnetfeltet og efterhånden afgiver deres energi til plasmaet, som opvarmes. Neutral-partikel-opvarmning vil være svær at håndtere i et kommende fusionskraftværk. Man arbejder derfor også med andre metoder, der baserer sig på opvarmning ved hjælp af højfrekvent (HF) elektromagnetisk stråling, der sendes ind mod plasmaet. Specielt gennem de sidste få år er der opnået gode resultater med HF-opvarmning, og det bliver sikkert en væsentlig supplerende opvarmningsmetode i kommende fusionskraftværker.

Med en kombination af neutral-partikel- og HF-opvarmning har man i JET opnået temperaturer i nærheden af 300 mio.K.

En almen vurdering af fusionsforskningens perspektiver må være, at vejen frem mod kommerciel udnyttelse af fusion bliver lang og kostbar og omfatter løsning af særdeles vanskelige tekniske problemer. I betragtning af de mange skridt, der skal tages, er det usandsynligt, at fusionsenergi vil komme til at udgøre en væsentlig del af energiforsyningen inden for de næste 40 år. Det må forventes at tage måske 25-30 år, inden kommerciel gennemførlighed er demonstreret, og først derefter bliver fusionskraftværker en mulighed, som for alvor må tages med i betragtning ved planlægning af nye kraftværker. Disse vurderinger er optimistiske i den forstand, at de forudsætter, at der ikke opstår uforudsete videnskabelige eller tekniske problemer, som ikke umiddelbart kan løses, ligesom de forudsætter, at de for forskningen nødvendige ressourcer vil blive stillet til rådighed. Det kan i den forbindelse nævnes, at de samlede udgifter på verdensbasis, der er nødvendige for at nå til demonstration af kommerciel gennemførlighed, vurderes til at kunne løbe op mod 1000 mia. danske kroner.

I det forløbne år har kold fusion, d.v.s. fusion der kan foregå ved stuetemperatur, været meget omtalt, idet 2 forskere ved et laboratorieforsøg mente at kunne påvise kold fusion. Der er overalt i verden gjort ihærdige forsøg på at eftervise den kolde

fusion, specielt i England, men det har ikke vist sig muligt at eftervise forsøget, og tanken om den kolde fusion anses derfor for urealistisk.

1.2. Energiforhold

Når det engang lykkes at opbygge en fusionsreaktor vil man have en uudtømmelig energikilde til rådighed.

Råprodukterne til fremstilling af fusionsbrændslet findes i meget store mængder i naturen. For fusionsreaktorer baseret på $D + T$ reaktionen og med tritium udvundet fra naturligt forekommende lithium er de tilgængelige energiresourcer i verden på $3 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{16}$ toe (tons olie-ekvivalent). De $3 \cdot 10^{12}$ svarer til anvendelse af ca. 10% af alle kendte lithiumforekomster. Hvis lithium imidlertid kunne udvindes af havvand (0,17 g/t), svarer energireserven til $3 \cdot 10^{16}$ toe. Energireserverne for fusionsreaktorer baseret på $D + D$ processer er givet ved deuteriumindholdet i verdenshavene; det svarer til ca. 10^{20} toe. For sammenligning skal nævnes, at det nuværende globale energiforbrug er på ca. 10^{10} toe pr. år.

Såvel deuterium som lithium er så billigt at udvinde, at prisen på råbrændstoffer for fusionsreaktorer bliver forsvindende i forhold til, hvad det i øvrigt kommer til at koste at fremstille energien på brugelig form (i form af el f.eks.).

Da deuterium fremstilles af vand, er der ingen reel geografisk begrænsning for, hvor det kan fremstilles. Lithiumforekomsterne er spredt over det meste af verden (også udbredt i Europa), og der vil derfor heller ikke opstå regionale problemer med at skaffe dette råprodukt for fremtidige fusionsreaktorer.

I omstående tabel er der forsøgt foretaget en sammenligning af energiforholdene omkring fusion og fission. Tallene for fusion er baseret på et skøn og er derfor meget usikre.

Energiinput og output over en 30-års periode.

		<u>Fusion</u>	<u>Fission</u>
Opbygning af kraftværk	(MWh_{th}/MWe)	4100	2160
Opbygning af brændstofinstal.	(MWh_{th}/MWe)	16	789
Brændstof til første kørsel	(MWh_{th}/MWe)	3	399
Brændstof for kørsel for livs- tid	(MWh_{th}/MWe)	87	5554
Totalt energi, input	(MWh_{th}/MWe)	4200	8902
Genereret energi, output	(MWh_{th}/MWe)	6.3×10^5	6.3×10^5
<u>Forholdet mellem genereret og indført energi</u>		<u>150</u>	<u>70</u>

MWh_{th} angiver den termiske energi, mens MWe angiver den elektriske energi, der produceres fra reaktoren.

Energiforbruget ved opbygning af et fusionskraftværk skønnes at være dobbelt så stort som energiforbruget ved opbygning af et fissionskraftværk (her er omkostningerne kendte og ikke et skøn). Det totale energiinput stiger dog væsentligt med energien krævet for at skaffe brændstof, hvad angår fissionsreaktoren. Tallene i tabellen angiver det mest optimistiske tilfælde for fission, men det mest pessimistiske skøn for fusion.

1.3. Miljøforhold

Sikkerhedsproblemerne i forbindelse med fusionsreaktorer vil være af en anden natur end ved traditionel kernekraft. I en fusionsreaktor vil der aldrig være brændsel til stede til mere end nogle få sekunder forbrænding, hvorfor der ikke vil være risiko for kernenedsmeltning. Der er derfor ikke behov for kontrolsystemer, der forhindrer nukleare effektudsving.

Det reagerende fusionsplasma holdes imidlertid sammen og isoleret fra reaktorbeholderens vægge af kraftige magnetfelter, og den oplagrede energi i disse felter er stor. En pludselig og

lokal frigørelse af denne energi, f.eks. ved spolesvigt, er en potentiel risiko, navnlig i betragtning af tilstedeværelsen af store mængder radioaktivt tritium og neutronaktiverede materialer i strukturen, der omgiver reaktorkammeret. Den store neutronstrøm fra fusionsplasmaet vil efterhånden kunne ødelægge de omliggende strukturmateriale og få dem til at bryde sammen. Metoder til modvirkning af de potentielle farer ved fusionsreaktorer er i princippet kendt, og udformningen af de endelige reaktorer må omfatte sikkerhedssystemer, som kan reducere farerne for og i påkommende tilfælde virkningerne af uheld til acceptable niveauer. Størrelsen af kravene til disse sikkerhedssystemer vil få direkte indflydelse på fusionsreaktorens økonomi.

I modsætning til fission er reaktionsprodukterne fra en fusionsreaktor inaktive. Der er imidlertid alligevel et problem med oplagring af radioaktivt affald på grund af neutronaktiveringen af reaktorkonstruktionen, ligesom der også skal tages specielle forholdsregler ved nedrivning af et fusionskraftværk. Dertil kommer problemer med at behandle og opbevare det radioaktive tritium, der indgår i fusionsprocessen. Men strålingsfaren fra affald fra en fusionsreaktor bliver betydeligt lavere end fra affald fra en fissionsreaktor, navnlig på langt sigt, da det ikke omfatter langlivet α -aktivt affald.

Fusionsreaktorer vil derfor ikke blive fuldstændigt ufarlige eller radioaktivitetsmæssigt helt rene, men vil indebære potentielle risici for miljøet.

1.4. Økonomi

Omkostningerne ved opbygning af en fusionsreaktor, der er beregnet ved en række modelprojekter, varierer meget. Omkostningerne ved etablering af turbine og elektrisk anlæg kan direkte opgives på basis af industrierfaringer, men omkostningerne ved etablering af selve fusionsreaktoren er meget usikre, dels på grund af at fusionen endnu ikke er en kendt og løst teknologi, dels på

grund af at der kræves helt nye fabriksforudsætninger. I nedenstående tabel er angivet omkostningerne beregnet i forskellige projekter. Priserne er angivet i millioner dollars.

	Reaktor- investering alene	Anlægs- inves- tering	Totale omkost- ninger	Reaktor-/ Anlægs- investering	Anlægsinvestering/ Totale omkostninger
PPPL	606	880	1215	0.69	0.72
UNPAK-I	574	1066	1433	0.54	0.74
UNPAK-II	775	1207	1615	0.64	0.75
UNPAK-III	812	2290		0.35	
Naamak	534	944	1140	0.63	0.74
Starfire	969	1727	2400	0.56	0.72
Culham IIB	656	911	1824	0.72	0.50
RFPR	397	828		0.48	
WITAMIR	1565	2063	2785	0.76	0.74
Wildcat	1497	2213	3076	0.68	0.72
MRS-IIA	1687	2460	3695	0.69	0.67
MRS-IIB	968	1647	2473	0.59	0.67
EBTR	1426	2109	2872	0.68	0.73
UNTOR-M	1765	2611	3758	0.68	0.69
MARS	1517	2365	3266	0.64	0.72
CRFPR.20.	415	1112	1515	0.37	0.73
PMR				0.25-0.32	

Kilde: Environmental impact and economic prospects of nuclear fusion.

I tabellen er reaktorinvesteringen indeholdt i anlægsinvesteringen. De totale omkostninger angiver alle omkostninger ved etablering af et fusionsreaktoranlæg.

I tabellen er angivet forholdet mellem reaktoromkostningerne og de totale omkostninger for forskellige reaktorer. Dette forhold varierer mellem 37% og 76% for de forskellige reaktorer. Der kan være forskellige årsager til disse variationer, dels er der

forskel i størrelserne, dels kan der være forskel på om det er en førstudviklet reaktor eller om reaktoren er baseret på tidligere indhentede erfaringer.

Da der er mange forhold, der således spiller ind på de her angivende omkostninger, vil det være vanskeligt at sammenligne disse omkostninger med andre kraftværker som f.eks. fissionsreaktorer.

En skønnet elektricitetspris pr. kWh for de tre forskellige reaktorer Starfire, CRFPR.20 og MARS fremgår af følgende:

	Starfire (10 ⁻³ \$/kWh)	CRFPR.20 (10 ⁻³ \$/kWh)	Mars (10 ⁻³ \$/kWh)
Årlig kapitalomk.	30.44	22.79	42.56
Driftsomk.	2.46	4.11	2.63
Udskiftninger	2.20	1.00	0.69
Brændstof	0.04	0.03	0.36
I alt	35.15	27.93	46.24

Idet der er regnet med en
inflation på 4%, svarer

dette i Dkr. i 1989 til 0,38 kr./kWh 0,30 kr./kWh 0,49 kr./kWh

Kilde: Environmental impact and economic prospects of nuclear fusion.

De årlige kapitalomkostninger er sat til 10% af investeringen i reaktoren over en 30 års periode. Priserne er 1980-priser. Det må bemærkes, at priserne kun er skøn, idet bl.a. de årlige kapitalomkostninger er meget usikre.

1.5. Konsekvensvurdering for det samlede elsystem ved benyttelse af fusion

Det ser i øjeblikket ud til, at fusionskraftværker kun vil kunne producere energi til konkurrencedygtige priser, hvis de bygges som store enheder, mindst nogle få GW_e pr. enhed. Fusionsenergien vil derfor blive brugt som energikilde i elkraftværker og måske

til fjernvarme. Hvis kravet om de store enheder ikke kan svækkes, vil der måske opstå problemer med at indpasse fusionsenergien i elsystemet. Der har dog især i de sidste år været en tendens til at tro, at også mindre enheder vil kunne blive konkurrencedygtige; men eventuelle tanker om at bruge fusionsenergien til andet end elproduktion i stationære kraftværker er næppe realistiske.

Fusionsenergi er en energikilde, som endnu ikke kan udnyttes til elproduktion. Der udføres på globalt plan et stort forskningsarbejde, som er rettet mod denne kommercielle udnyttelse. Man må regne med, at det vil tage 25-40 år, inden kommerciel gennemførlighed er demonstreret, og først da vil fusionsenergien være en mulighed, som kan tages i betragtning ved planlægning af nye kraftværker.

1.6. Industripolitiske aspekter

Fusion er en teknologi, der indenfor de næste 25-40 år stadig vil være på forskningsniveau, og vil således ikke have nogle væsentlige industripolitiske følger.

Dansk medvirken i fusionsforskningen vil dog give mulighed for dansk industrideltagelse i de meget store fusionseksperimenter, der sandsynligvis vil følge efter JET.

1.7. Fremtidig forskning og udvikling

Figur 1.2 viser en principtegning af et fusionskraftværk. Det fremgår heraf, at der er mange teknologiske problemer. Det brændende plasma holdes indesluttet af et magnetfelt i et kammer, hvis vægmateriale udgør en afskærmningskappe, der indeholder lithium. Neutroner og varmestraling fra plasmaet afsættes i afskærmningskappen. Nogle af neutronerne reagerer med Li-kerner og danner tritium, som sammen med deuterium, der er udvundet af havvand, bruges til at brændstofføde plasmaet. Forbrændings-

produktet, helium samt en del uforbrændt deuterium og tritium trækkes ud af plasmaet, hvor heliummet fjernes i et oparbejdningsanlæg, mens deuteriummet og tritiummet føres tilbage til plasmaet. Varmen fjernes fra afskærmningslaget ved hjælp af et kølekredsløb, der danner damp i en dampgenerator. Dampen bruges til at trække en turbine, der igen trækker en elgenerator.

Som eksempel på endnu mere eller mindre uløste tekniske problemer kan nævnes:

- dannelse af tritium ved de allerede nævnte formeringsprocesser og håndtering af denne tritium.
- udvikling af en teknologi, hvormed superledende magnetspole-systemer kan generere de for plasmaindeslutningen nødvendige magnetfelter.
- udvikling af vægmateriale til reaktorbeholderen, som kan holde til den intensive bestråling fra fusionsplasmaet.
- fjernhåndtering ved vedligeholdelse og reparation af fusionsreaktorens yderst komplicerede dele.
- omdannelse af fusionsenergien, der navnlig fremkommer som kinetisk neutronenergi til elektrisk energi på forsyningsnettet.
- indskydning af nyt brændsel i det varme plasma.

At påvise den tekniske gennemførbarhed af fusionsenergien er det vigtigste mål for de store og kostbare maskiner, der for øjeblikket er ved at blive planlagt flere steder (INTOR som et fælles projekt for EF, USA, USSR og Japan og NET som et rent EF-projekt). Det vil tage lang tid at designe og bygge maskiner af denne type og en demonstration af teknisk gennemførbarhed kan derfor tidligst ventes i slutningen af 1990'erne.

1.8. Datablad

Datablad for fusion er ikke relevant, da teknologien ikke forventes at være kommercielt udviklet inden år 2030.

2. VINDENERGI

2.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering

En vindmølle omformer vindens energi til mekanisk energi. Den mekaniske energi kan enten udnyttes direkte i maskiner eller den kan omformes til elektricitet med en elektrisk generator eller til varme med en vandbremse. I det følgende vil det kun være vindmøllen til elproduktion der omtales.

Vindmøller har i flere perioder haft en stor udbredelse i Danmark, men med den billige olie i 1980'erne forsvandt interessen.

Efter den første energikrise i 1973 kom initiativerne med henblik på udnyttelse af vindkraften i energiforsyningen i Danmark igen. Initiativerne blev taget af mindre fabrikanter, opfindere og institutioner, bl.a. Tvindskolerne.

Handelsministeriet startede i midten af halvfjerdserne et forskningsprogram for større vindmøller sammen med elværkerne, og på Forskningscenter Risø blev oprettet en Prøvestation for mindre vindmøller.

Tvindskolerne i Ulfborg startede i 1975 bygningen af en 2 MW vindmølle med en rotordiameter på 54 meter og en navhøjde på 53 meter. Den blev sat i drift i 1978, og var i flere år verdens største vindmølle.

Parallelt med dette var der mange folkelige initiativer afledt af miljødebatten (NOAH) og energidebatten (OOA og OVE) samtidig med, at der blevet taget mange initiativer af højskoler med bygning af vindmøller, solfangere osv., og aftenskoler, der lavede kurser om vedvarende energi. Endelig oprettede Handelsministeriet et Energioplysningsudvalg, der udsendte oplysningsmaterialer om energispørgsmål.

De nævnte aktiviteter medvirkede sammen med politisk medvind til, at den danske udvikling med vindkraft startede så tidligt, som den gjorde.

Vindmøller opstillet fra 1976 til 1979 var både selvbyggermøller og fabriksfremstillede vindmøller. Det var hovedsagelig vindroser og stallregulerede nettilsluttede propelvindmøller, der blev opstillet, men de fleste andre kendte typer blev også fremstillet eller forsøgt fremstillet i den årrække.

I 1979 blev den første tilskudsordning til vedvarende energianlæg vedtaget i Folketinget. Tilskudsordningen rummede bl.a. mulighed for, at vindmøllekøbere kunne få 30% tilskud af anlægsprisen fra staten, såfremt anlægstypen var godkendt af Prøvestationen for Vindmøller.

Frem til begyndelsen af 80'erne er der i privat regi lavet forsøg med mange forskellige typer vindmøller, hvoraf kan nævnes 2- og 3-bladede propelvindmøller, darrieuxvindmøller, gyromøller, vindroser. I dag er produktionen af møller stort set koncentreret om den trebladede horisontalakslede, stall- eller pitchregulerede nettilsluttede propelvindmølle.

De små fabrikker havde en lille produktionskapacitet, og de lidt større valgte i starten kun at lave små serier for at undgå dyre fejltagelser i store serier, med baggrund i en erkendelse af, at det drejede sig om en ny og relativ kompliceret teknologi. Kendskabet til last- og styrkeberegning for vindmøller var på det tidspunkt meget lidt udviklet, og baserede sig i starten i høj grad på først at fremstille vindmøllerne og derefter drage erfaringer udfra de opførte møller ("trial and error").

Efterhånden er en mere præcis viden om vindmøllernes dimensionering opbygget. Med baggrund i erfaringerne blev der udviklet mere sikre og hensigtsmæssige styrings- og sikkerhedsstrategier, hvilket har betydet, at de danske vindmøller sikkerhedsmæssigt i dag har en meget høj standard sammenlignet med andre lande,

og at vi på det sikkerhedsmæssige område har dannet forbillede for andre.

Med tilskudsordningen fra 1979 kom der for alvor gang i udbygningen med vindkraft i Danmark. Siden 1982 er der opbygget en stor eksport, der de første år hovedsagelig var til Californien.

Til belysning af den generelle udvikling af danske vindmøller kan bl.a. betragtes udviklingen af 55 kW-vindmøllerne. Energiproduktionen for 55 kW vindmøllerne opsat i 1985 er omkring 50% bedre end for møllerne opsat i 1980 og 1981. Dette skyldes bl.a. forbedret pålidelighed og bedre placeringer af vindmøllerne. Pålideligheden er efterhånden så høj for de nyere vindmøller, at produktionstabene ved havarier på vindmøllerne ligger betydeligt under 5%, og sandsynligheden for et alvorligt havari pr. år ligger under 1%.

Med de voksende seriestørrelser på grund af den store eksport er opnået prisreduktioner på de fleste komponenter på vindmøllerne. De vigtigste prisreduktioner er sket på komponenterne: vinger, gear og tårne, men også for de resterende dele er der opnået fordele af større serier.

Størrelsen af de kommercielle vindmøller i Danmark er udviklet fra 11-30 kW vindmøller med en rotordiameter på 10 meter og tårnhøjde på 12-18 meter i 1979 til 75-400 kW vindmølle med en rotordiameter fra 17 til 35 meter og til en navhøjde på 18-40 meter. Udviklingen i fremtiden forventes at gå mod, at vindmøllerne fortsat bliver større, samt at der sker en tilpasning af mølletyper til forskellige placeringer (f.eks. havbaserede møller).

Vindmøllerne er således blevet billigere på grund af mere økonomiske design og på grund af større vindmøller. Der skønnes dog stadig at være et betydeligt potentiale i retning af billiggørelse af vindmøllerne gennem en indsats ved hjælp af forskning, udvikling, design og konceptstudier.

Den generelle udvikling med opførelse af vindmøller i Danmark fik fra 1983 et nyt element, nemlig vindmølleparker.

Vindmølleparkerne blev i starten alene opført af private med vindmøllestørrelser på 55 kW, med rotordiameter på 16 meter og tårnhøjde på 22 meter. Parker opføres nu med større vindmøller. Elværkerne har indgået en aftale med staten, som indebærer bygning af 100 MW vindkraft frem til udgangen af året 1990.

Med hensyn til eksportmarkedet kan pålideligheden med fordel forbedres yderligere, idet service og eftersyn foretaget af montør i udlandet i garantiperioden for sælger og efter garanti-perioden for køber kan blive relativt dyrt i forhold til vindmøllernes energiproduktion. En garanteret høj pålidelighed vil endvidere være et væsentligt salgsargument for danske fabrikanter.

Hvis den private udbygning fortsætter med samme takt som hidtil, vil der med udgangen af 1990 i Danmark være installeret omkring 250 til 350 MW.

Andelen af vindkraft i forhold til det samlede danske elforbrug i år 2000 afhænger i høj grad af, hvilke udbygningsstrategier der vælges. I tidligere energiplaner har en udbygning med vindkraft, der svarer til 10% af det samlede elforbrug været nævnt. At dette ikke er urealistisk i forhold til produktionskapaciteten i den danske vindmølleindustri, kan ses af, at der i 1985 blev eksporteret omkring 300 MW vindkraft, hvilket svarer til omkring 2% af det samlede danske elforbrug. Udbygningen i Danmark har i 1988 og 1989 været omkring 0,5% pr. år, hvilket uden ændring i udbygningstakten medfører en kapacitet på 6-8% ved år 2000.

Vindmøllernes principielle opbygning

På figur 2.1 er vist en principskitse af en nettilsluttet propelvindmølle.

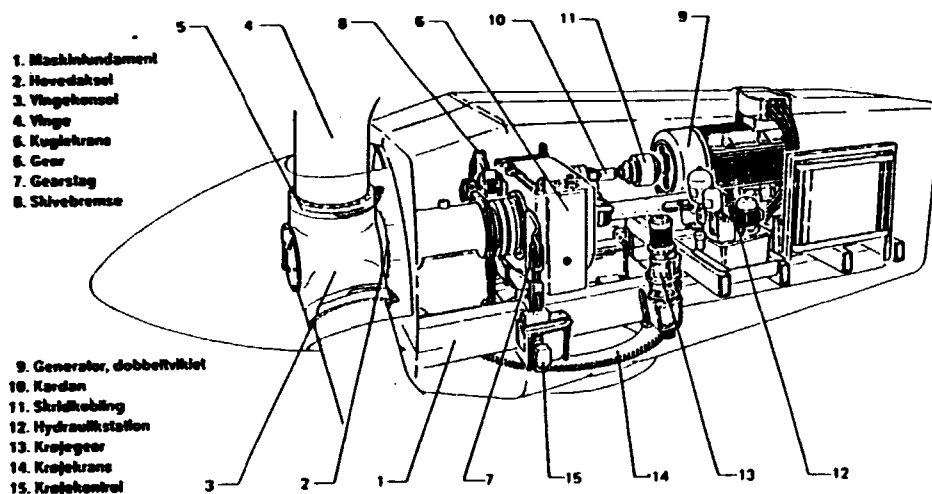


Fig. 2.1. Principskitse af nettilsluttet vindmølle

Når vinden møder vindmøllens vinger, vil en del af bevægelsesenergien i vinden omsættes af vingerne til mekanisk energi. Vingerne er fastgjort via et nav til en hovedaksel. Hovedakslen er fastholdt af 2 lejer. På hovedakslen sidder en mekanisk bremse og en gearkasse, hvorfra effekten overføres til en generator, der omformer den mekaniske effekt til elektrisk effekt. De her nævnte dele er placeret på et maskinfundament og er normalt overdækket med en skærm. Generatoren er tilsluttet et energisystem, og tilslutningen styres af et elektrisk, mekanisk eller hydraulisk styrings- og reguleringssystem. Endvidere består vindmøllen af et tårn, der enten er af stål (rør eller gittermast) eller beton, samt af et krøjesystem, der drejer vindmøllens maskinkabine i forhold til vindretningen.

Flere vindmølletyper er forsynet med 2 generatorer - en lille, der fungerer ved lave vindhastigheder, og en stor, der bruges ved høje vindhastigheder. Herved opnås mere optimale driftsbetingelser for møllen, idet der opnås højere virkningsgrader for vingerne, transmissionssystemet og generatoren. Omkoblingerne

mellem de forskellige generatorer foregår automatisk, afhængig af den afgivne elektriske effekt.

De vindmøller, der er i serieproduktion i Danmark i 1989, har en rotordiameter mellem 17 m og 35 m, en elektrisk effekt mellem 75 kW og 450 kW og en tårnhøjde mellem 18 m og 40 m. Drifts-omdrejningstallet varierer fra 50 omdrejninger pr. minut på de mindste møller til omkring 30 omdrejninger pr. minut på de største.

For denne størrelse vindmøller har rotoren et omdrejningstal på 20 til 40 omdrejninger pr. minut, og omdrejningstallet er normalt afpasset så spidsen af vingerne får en hastighed på mellem 40 m/s og 70 m/s. Omdrejningstallet er bestemt af netfrekvensen og omsætningsforholdet i gearet.

Vindmøller på over 600 kW er etableret 4 steder i Danmark (Tvind, Nibe, Masnedø og Esbjerg), fordelt på 9 møller med en samlet elektrisk effekt på omkring 9 MW. Disse møller har betontårne.

Vindmølleparker

Vindmølleparker defineres som mindst 3 vindmøller placeret på én plads. Afstanden mellem de enkelte møller er typisk 4-8 gange rotordiametrene, og vindmøllerne er normalt placeret således, at de skygger mindst muligt for hinanden i den fremherskende vindretning.

Den overordnede styring af en vindmøllepark sker via et centralt kontrolanlæg. Vindmølleparkerne tilsluttes normalt nettet i den nærmeste transformatorstation.

Der findes i Danmark 23 vindmølleparker større end 500 kW i drift med en samlet installeret effekt på omkring 40 MW. Der er kun en af disse vindmølleparker (Masnedø), der består af store møller.

Havplacerede vindmølleparker

Baggrunden for at etablere vindmøller på havet er hovedsageligt, at det er vanskeligt at finde tilstrækkelig mange gode placeringsmuligheder for vindmølleparker på land. En stor del af de bedste vindmæssige områder på land kan ikke udnyttes, idet andre interesser såsom f.eks. fuglebeskyttelsesinteresser (ramserområder) forhindrer opsætning af vindmøller. Årsproduktionen for vindmøller placeret på havet er større end på land.

Der findes for øjeblikket ingen vindmølleparker på havet. Derimod findes der f.eks. i Danmark en enkelt vindmøllepark ved Ebeltoft placeret på en mole.

Der er siden 1980 lavet forskellige undersøgelser af de tilgængelige vindressourcer på havet omkring Danmark og gennemført forskellige teknisk/økonomiske konceptstudier af Elværkerne, Planstyrelsen, Århus Amt og forskellige private firmaer, der har lavet studieprojekter (Nordsminde Flak, Fjellerup og andre).

Energiministeriet nedsatte i efteråret 1987 et udvalg til bl.a. at finde egnede placeringsmuligheder for vindmølleparker på havet. I udvalget deltog bl.a. elværkerne. Undersøgelsen tager udgangspunkt i havdybder på 2-6 m, da disse havdybder er bedst økonomisk set.

Inden udgangen af 1990 forventes Elkraft at bygge den første havmøllepark i Danmark nordvest for Vindeby på Lolland. Vindmølleparken får en effekt på ca. 5 MW og bliver placeret 2-5 km fra kysten på omkring 6 m's dybde.

2.2. Energiforhold

En vindmølle kan teoretisk udnytte 59% af vindens energiindhold, men i praksis udnytter en vindmølles propeller maksimalt i dag omkring 50% af vindens energiindhold. Derudover er der et tab

i gearkasse og generator, hvorved virkningsgraden falder yderligere.

Den samlede effektivitet af vindmøllerne (virkningsgraden) er fra 1979 til medio 1987 forbedret med 30-40%, hvilket er illustreret i nedenstående tabel. Effektiviteten er defineret som forholdet mellem den afgivne elektriske effekt og vindens effekt i det af vindmøllens vinger bestrøgne areal.

Størrelse (kW)	Maksm.effektiv. (%)	Forbedring	Opstillingsperiode
11- 30	30-35	-	1977-1983
45- 55	35-40	15	1979-1985
80-100	38-42	23	1983-1987
140-180	42-46	35	1987-

Udover at vingerne har en forbedret maksimal effektivitet, har de nyeste vindmøller også en relativ høj effektivitet i et større driftsområde.

Betragtes hele perioden, ses en relativ stigning i energiproduktionen pr. m^2 bestrøget areal. Dette skyldes at:

- vindmøllerne bliver mere pålidelige med færre driftsstop
- vindmøllerne opsættes på steder med større vindressourcer
- vindmøllerne bliver mere effektive
- vindmøllerne har højere tårne (større vindmøller).

En vindmølles placering er afgørende for hvor meget energi vindmøllen kan producere pr. år.

Vindressourcerne i Danmark bestemmes ud fra metoden beskrevet i "Vindatlas for Danmark". Metoden opdeler landskabet i 4 ruhedsklasser afhængig af forhindringer i terrænet som skove, træer, læhegn og bygninger. Opdelingen i ruhedsklasser fremgår af omstående tabel.

Ruhedsklasse	Terræntype	Relativ energi 40 m's højde
0	- Vandområder	10
1	- Bedste indland (åbne land- områder uden væsentlig beplantning og bebyggelse)	7
2	- Landbrugsområder med spredt bebyggelse og hegn med en gennemsnitsafstand på 1000 m	5
3	- Samlede bebyggelser, skove og landbrugsområder med mange hegn	3

Nedenstående tabel viser energiproduktionen og benyttelsestiden for en omtrent 30 m høj mølle placeret i 4 forskellige ruheds-
klasser. Benyttelsestiden findes ved at dividere årsproduk-
tionen med vindmøllens mærkeeffekt.

Ruhedsklasse	Udnyttet vindenergi kWh/m ² , år	Benyttelsestid. Timer/år (=kWh/kW, år)
0	1360	3460
1	1020	2600
2	820	2090
3	531	1350

Som det ses er en vindmølles placering meget afgørende for den
årlige energiproduktion, og det er derfor vigtigt at få fore-
taget en vindatlasanalyse for det sted, hvor møllen tænkes op-
stillet.

Når vindmøller placeres i parker, vil de læ eller skygge for hinanden. Vindmøllerne vil oftest stå i rækker orienteret fra nord-nord vest til syd-sydøst. Afstanden mellem møllerne i rækkerne vil typisk være 2-5 gange rotordiameteren og afstanden mellem rækkerne vil typisk være mellem 5 og 10 gange rotordiameteren.

Det forventes, at vindmølleparker bliver placeret på ekstraordinært gode steder, hvilket giver en betydelig større produktion end gennemsnittet af enkeltstående vindmøller, selvom der er et tab, fordi vindmøllerne giver læ for hinanden. I praksis har det imidlertid vist sig i forbindelse med elværkernes udbygning med vindkraft, at andre interesser tvinger vindmølleparkerne ud i vindmæssigt mindre gode områder.

Vindmøller placeret på havet giver en forøget energiproduktion i forhold til møller placeret på land. Forøgelsen af energiproduktionen kan illustreres ved, at energiproduktionen stiger med 33% fra en ruhedsklasse 1 placering på land til en havplacering og med 66% fra en ruhedsklasse 2 på land.

Der vil dog ske et tab i elnettet mellem møllerne og fra parken til 60 kV-transformerstationen på land. Tabet vil typisk være mindre end 5%.

Vindmøller på havet skal være placeret mindst 2-3 km fra kysten for at komme fri af lævirkninger fra land.

2.3. Miljøforhold

Ved at benytte vindmøller til elproduktion reduceres luftforureningen, da vindmøllerne erstatter elproduktion baseret på fossile brændsler.

Derimod kan støj fra vindmøllerne fremkalde miljømæssige problemer. Vindmøller har derfor indtil nu skulle godkendes af amterne på baggrund af Miljøstyrelsens bekendtgørelser. I for-

bindelse med en reduktion af miljølovens liste over godkendelsespligtige anlæg vil listens 2 punkter om vindmøller imidlertid blive fjernet. Gennem en bekendtgørelse vil miljøgodkendelsen blive afløst af en anmeldelseordning gældende alle størrelser på møller. Ordningen skal administreres af landets amtsråd. Der fastsættes en maksimal grænse for støjbelastning fra vindmøller ved udendørs opholdsarealer i umiddelbar tilknytning til nabo-beboelser i det åbne land på 45 dB(A). Er naboområder til vindmøller af mere støjfølsom karakter, er grænsen 40 dB(A). I forbindelse med anmeldelse skal en målerapport vedlægges med støjmålinger og -beregninger, der viser, at den fastsatte støjbelastning kan overholdes. Et bilag til bekendtgørelsen indeholder retningslinier for støjmålemetode og beregningsformler samt gennemregnede eksempler.

Møllerne påvirker visuelt det omgivende landskab. Denne visuelle påvirkning er afhængig af mange forhold, først og fremmest møllernes udformning og størrelse. Ved placeringen af vindmøller ser man i forbindelse med opstillingstilladelser generelt mere lempeligt på placeringen af små enkeltstående vindmøller end på placeringen af større møller eller hele vindmølleparker.

Samtlige amtskommuner i landet er i færd med eller har udarbejdet forslag til regionplantillæg omkring placering af vindmøller og vindmølleparker. Forslagene godkendes af Planstyrelsen.

2.4. Økonomi

Der er stor forskel i økonomien for forskellige vindmøller. Økonomien afhænger af bl.a. størrelsen af vindmøllen, fabrikatet og typen af vindmølle. Også installationsudgifterne varierer en del fra tilfælde til tilfælde, afhængig af hvor i landet møllen opsættes.

Budgettet for opstilling af en 225 kW vindmølle med 30m tårn ser for de bedste ud som følgende:

Vindmøllens pris af fabrik

Inkl. opstilling	1.045 kkr.
Fundament	90 -
Nettilslutning	200 -
Elinstallation og eltilslutning	25 -
Øvrige udgifter, herunder projektering, tilsyn og administration	<u>60 -</u>
Samlet investering	1.420 kkr.

Investeringsprisen for en 225 kW mølle er således 6.300 kr. pr. kW.

Investeringen i vindmølleparker bestående af vindmøller i størrelsen 100-400 kW vurderes på nuværende tidspunkt at være 6.000-8.000 kr./kW. Selve møllerne eksklusiv fundament udgør ca. 70% af prisen. Der er indtil nu ikke konstateret den store prisforskel på møller placeret enkeltvis og i parker.

Der er nogle forhold, der gør vindmølleparker dyrere end enkeltmøller, mens der er andre forhold, der gør dem billigere. Eksempelvis er udgifterne til nettilslutning normalt billigere for vindmølleparker, hvorimod en vindmøllepark som oftest kræver fjernovervågning, hvilket gør vindmølleparkerne dyrere.

Store vindmøller (> 500 kW) er i dag vanskelige at vurdere, da der endnu ikke har været nogen serieproduktion af store møller.

De samlede årlige drifts- og vedligeholdelsesudgifter inklusive forsikring og renoveringer udgør omkring 1,5 - 2,5% af anlægsprisen. Dette varierer dog mellem de enkelte vindmølle typer.

Økonomien i en 225 kW vindmølle

Samlet investering	1.420 kkr.
Drift og vedligehold: år 1- 2	20 kkr.
år 3- 5	28 kkr.
år 6-20	35 kkr.
Levetid	20 år
Realrente	7% p.a.
Årlig elproduktion: ruhedsklasse 1	490.000 kWh
ruhedsklasse 2	380.000 kWh
Annueret produktionsomkostning: ruhedsklasse 1	33,4 øre/kWh
ruhedsklasse 2	43,2 øre/kWh

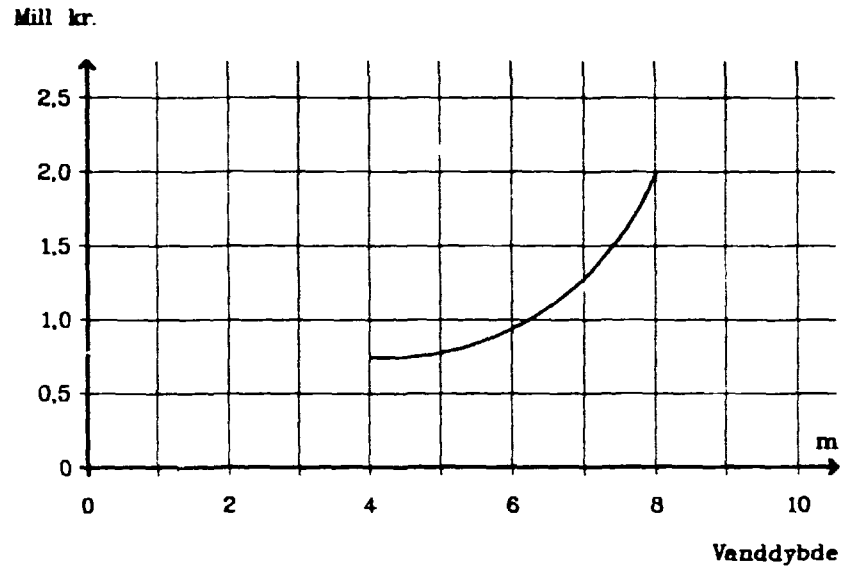
Den i ovenstående tabel viste mølle er opstillet på en god placering i ruhedsklasse 1 og en middelfod placering i ruhedsklasse 2. Der er regnet med et driftstab på 10%.

For havplacerede vindmølleparker er der i princippet 4 hovedkomponenter der har indflydelse på prisen: Fundament, mølle, eltilslutning, herunder søkabel og projektering.

Mølleprisen er som tidligere nævnt afhængig af størrelsen. Prisen for eltilslutning varierer bl.a. af afstanden til nærmeste transformerstation, mens fundamentprisen er afhængig af vanddybden (figur 2.2).

Budgettet for anlægsomkostningerne for Elkrafts planlagte havplacerede vindmøllepark i Vindeby bestående af 11 (450 kW) vindmøller vil ved en placering på omkring 6 meters vanddybde fordele sig omtrent således pr. mølle:

Fundament	1.260 kkr.
Vindmølle	2.350 -
Elttilslutning	1.290 -
Projektering og andet	1.070 -
Samlet investering pr. mølle	5.970 kkr.



Figur 2.2. Fundamentpris afhængig af vanddybde
Kilde: Forsyningskataloget 88

Den årlige elproduktion for parken er beregnet til 966 MWh pr. mølle. Drifts- og vedligeholdelsesudgifterne skønnes at være omkring 0,08 kr./kWh. Bl.a. ud fra ovennævnte forudsætninger har Elkraft beregnet en elpris på 0,56 kr./kWh.

2.5. Konsekvensvurdering for det samlede elsystem ved benyttelse af vindenergi

Det energisystem de fleste vindmøller bygges til at indgå i er et stort elektrisk net, dvs. vindmøllernes produktion vil være lille sammenlignet med den totale elproduktion.

Vindmøller tilsluttes normalt det eksisterende elnet, og kravet til stabil netfrekvens og spænding skal derfor opfyldes af det eksisterende kraftværkssystem.

Vindkraftens samspil med det samlede elsystem er afhængig af en lang række forhold, herunder størrelsen af vindkrafteffekten i systemet, forsyningssikkerhedsmæssige aspekter og det oprindelige elsystems sammensætning.

Vindkraftens effektmæssige værdi i forhold til konventionelle kraftværker er undersøgt af DEFU i 1983. Konklusionen for disse undersøgelser er, at for en 100 MW installeret vindmølleeffekt kan disse tilskrives en effektværdi på 30% af et konventionelt kraftværk. For en udbygning fra 100 MW til 1000 MW kan vindmøllerne tilskrives en effektværdi på 20%.

2.6. Industripolitiske aspekter

Teknisk set er de danske vindmøller i dag forrest i udviklingen, og Danmark har derfor en stor eksport af vindmøller især til Californien. Eksporten af vindmøller startede i 1981 og steg voldsomt indtil 1985. I 1988 blev der eksporteret vindmøller for i alt 250 mill.kr. Investeringen i vindmøller opsat i Danmark var ligeledes 250 mill.kr.

Den samlede investering i vindmøller i Danmark samt eksporten i perioden 1980-1988 fremgår af nedenstående tabel.

	<u>Opstillet i Danmark</u>			<u>Eksport</u>
	Antal	Effekt (MW)	Omsætning (Mkr)	Omsætning (Mkr)
1980	200	5	25	-
1981	220	7	50	4
1982	150	7	50	10
1983	100	4	35	200
1984	150	8	80	1000
1985	314	25	200	2000
1986	320	30	250	1200
1987	300	35	200	400
1988	300	45	250	250
I alt			1140	5064

Kilde: Forsyningskataloget 1988

Elproduktionen var i 1988 i Danmark 30 TWh, hvoraf 0,37 TWh blev produceret ved vindkraft, hvilket svarer til 1,2%.

Til produktion af de 30 TWh elektricitet benyttes ca. 270 PJ brændsel (hovedsagelig kul) importeret til den for øjeblikket lave kulpris på 10 kr/GJ. Elproduktionen på 373 GWh fra vindmøllerne har således givet anledning til en årlig direkte valuta-besparelse på 34 mill.kr.

Den samlede investering i vindmøllerne var indtil 1988 1140 mill.kr. Den samlede vindmølleeffekt er 197 MW. Dette giver anledning til en effektbesparelse på 50 MW, hvilket svarer til en sparet kraftværksinvestering på 400 mill.kr. (udregnet efter kurve side 222 i Forsyningskataloget 1988 (33-34)).

	Importkvoter	Beskæftigelse personår pr. invest mill.kr.
Kraftværk	44%	2,6
Vindmølle	28%	3,0

Kilde: Forsyningskataloget 1988.

Benyttes de i Forsyningskataloget angivende import- og beskæftigelseskvoter, fås at vindmøllerne indtil nu har givet en merbeskæftigelse på omkring 17.000 personår. Den samlede valuta-indtægt er ca. 3.500 mill.kr. ifølge nedenstående tabel. Dertil skal lægges den førnævnte årlige valuta-indtægt på 34 mill.kr. fra brændselsbesparelsen, som vil stige i takt med importpriserne.

	Virkning af mølleinvestering i Danmark (mill.kr.)	Eksport (mill.kr.)
Eksport af møller		5064
Importindhold i salg	-319	-1418
Sparet import til kraftværksinvestering	176	
Valutaindtægt	-143	3646

Vindmøllerne har således givet anledning til en stor valutaindtægt, og det må derfor vurderes som hensigtsmæssigt at fastholde hjemmemarked, for således at sikre en stabil afsætning og på denne måde fastholde eksporten både af hensyn til beskæftigelse og valuta.

2.7. Fremtidig forskning og udvikling

Indtil nu har fabrikanterne specielt koncentreret sig om pålideligheden af vindmøllerne, og vindmøllerne har da også i dag opnået en rimelig pålidelighed.

Et væsentligt punkt for den fremtidige udvikling er i dag en forbedring af vindmøllernes økonomi. Denne forbedring kan opnås ved at satse på en udvikling indenfor følgende områder:

- En generel konceptoptimering af konstruktionen med hensyn til bl.a. størrelse, specifik effekt og vind-/klimatilpasning.
- En udvikling af mere effektive delsystemer, herunder bedre rotorere, styrenger, etc.
- En optimering af den nuværende konstruktion, der muliggør en reduktion af materialeforbrug.
- En forbedring af konstruktionerne i en mere procesvenlig retning.
- En videreudvikling af produktionsteknik og -planlægning.

En videreudvikling af vindmøllen som ovenfor nævnt vil kunne medføre en prisreduktion. Yderligere reducerer serieproduktion af vindmøller prisen væsentligt. De største serieproducerede vindmøller ligger i dag på 450 kW, men det må forventes, at denne størrelse stadig stiger.

Udviklingen for havplacerede vindmøller vil være meget afhængig af udviklingen af vindmøller generelt. Økonomien for de havplacerede vindmøller vil forbedres i takt med at de serieproducerede vindmøller bliver større, da der er store faste omkostninger til fundamenter og nettilslutning ved etablering af vindmølleparker på havet.

Som tidligere omtalt etablerer Elkraft den første havmøllepark nordvest for Vindeby på Lolland i løbet af de næste år. Dette vil være det første væsentlige skridt på vejen for udviklingen af havplacerede vindmøller.

2.8. Datablad

Teknologi: 250 kW vindmølle - 500 kW vindmølle

Input : Vind

Output : Elektrisk energi

	1988	2000	2015	2030
Benyttelsestid (timer/år)	2200	2500-2900	2900	3000
Levetid (år)	20	20	25	25
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kW)	6000-8000	5000-6000	4000-5000	4000-5000
Årlige driftsomkostninger (øre/kWh)	6-4	5-3	3	3

Benyttelsestiden og investeringer pr. kW er dårlige redskaber til at beskrive vindmølleområdet. Det væsentlige i ovenstående skema er tendensen i benyttelsestiden koblet sammen med investering pr. kW. Ovennævnte forudsigelser er antaget ud fra, at vindmøllerne placeres vindmæssigt svarende til den hidtidige udbygning. Andre interesser såsom fredning etc. kan derfor reducere benyttelsestiden, hvilket påpeger nødvendigheden af at få foretaget afvejning af vindkraft i forhold til andre interesser.

3. SOLENERGI

Området solenergi kan opdeles i de tre områder

- aktiv solvarme
- passiv solvarme, og
- solceller.

Beskrivelsen af den teknologiske udvikling på området vil omfatte alle områderne, mens de efterfølgende afsnit vedrørende energi, miljø, økonomi etc. kun vil omhandle solvarmecentraler og solceller, da de øvrige områder er behandlet i en udredning om energiforbruget i bygninger.

3.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering

Aktiv solvarme

Interessen for solvarmeanlæg herhjemme startede efter energikrisen i 1973. Der blev udført forskelligt forberedende forskningsarbejde vedrørende solvarmen i de følgende år, og de første danske fabrikanter af solvarmeanlæg opstod. Endvidere gik en del selvbyggere i gang med at bygge solvarmeanlæg.

I 1977 startede Energiministeriets (dengang Handelsministeriets) forskningsprogram (EFP) om solvarme med hovedvægten lagt på demonstrationsanlæg, nemlig brugsvandsanlæg og anlæg til kombineret rum- og brugsvandsanlæg til parcelhuse. Resultaterne fra disse anlæg var imidlertid skuffende, idet ydelserne ikke blev som antaget.

I 1979 skete der en prisstigning på 100% på olie. Samtidig blev tilskuddet på 30% til solvarmeanlæg indført, og der dukkede en masse nye fabrikanter op på markedet i forventning om fremtidige afsætningsmuligheder. Ved slutningen af 1979 fandtes således ca.

25 fabrikker på det danske marked. Antallet af fabrikker faldt siden til ca. 5-6 i 1983 og har holdt sig på det niveau siden da.

I perioden op til oprettelsen af Prøvestationen for Solvarmeanlæg i 1981 blev der udviklet meget forbedrede komponenter i et samarbejde mellem fabrikker og offentlige institutioner. På baggrund heraf samt erfaringerne fra de første demonstrationsprojekter blev det i EFP besluttet at opføre nogle "2. generations" demonstrationsprojekter, nemlig brugsvandsanlæg til parcelhuse. De optimerede anlæg blev bygget i 1980 og målingerne afsluttet i 1981. Resultaterne var gode og anlæggene ydede det de beregningsmæssigt skulle.

Der er nu tegn på en stigende interesse for solvarmeanlæg. Energistyrelsen har således i de første fem måneder af 1989 givet 290 tilsagn om tilskud. Dette er næsten ligeså mange som i 1988 (301) og flere end i 1987 (224) og 1986 (191). De regionale solvarmekampanjer har ganske givet medvirket til dette. Derudover er interessen for solvarme steget i VVS-branchen. Måske er årsagen også, at miljøbevidstheden i befolkningen generelt er øget, således at mange ikke stiller så store krav om et økonomisk overskud.

Forskningsindsatsen har været af begrænset omfang. Forskningsindsatsen vedrørende større anlæg er først startet fornyligt. Der er dog allerede udført forskning med positivt resultat, og sådanne anlæg forventes at komme på markedet på kort sigt.

Udviklingen for brugsvandsanlæg har siden 1980 gået i retning af simple anlæg uden unødigt komplicerede VVS-installationer med tilhørende styring. Anlæggene er blevet mindre, idet erfaringerne har vist, at de første anlæg var overdimensionerede. Den ydelse, der i 1977 kunne opnås med et anlæg på 10 m², kan i dag opnås med blot 4 m² solfangermodul. Driftssikkerheden er også blevet markant forbedret.

Opbygningen af edb-værktøjer til simulering af anlægsydelse

har været en vigtig faktor i udviklingen af korrekt dimensionerede anlæg.

Hovedparten af de anlæg, der opføres i dag, har selektive absorber overflader, som var kendte før 1981, men ikke anvendt på grund af for høj pris. Anvendelsen af selektive overflader er en af hovedårsagerne til, at dagens anlæg giver et væsentligt større udbytte pr. arealenhed end tidligere.

Der er i dag omkring 4000 anlæg i drift i Danmark, børnesygdommene ved udnyttelse af solvarme til brugsvandsopvarmning er efterhånden udryddet, og det er typisk, at anlægsejerne er tilfredse med deres anlæg, og at anlæggene fungerer uden indgreb.

På trods af at brugsvandsanlægget må karakteriseres som kendt teknologi, har den ikke været i stand til at slå igennem på markedet på grund af prisen samt manglende information til potentielle brugere om de tekniske forbedringer, der er sket.

Varmtvandsforbruget var tidligere typisk omkring 200 l pr. familie pr. dag, og der kunne derfor opnås stor besparelse om sommeren ved etablering af solvarmeanlæg. I dag er varmtvandsforbruget faldet drastisk, og et forbrug på 50 l er ikke ualmindeligt. Den årlige besparelse ved solvarmeanlægget til brugsvandsopvarmning ligger derfor nu på højst 2.000 kr. Der skal heraf påregnes en årlig vedligeholdelsesudgift på ca. 500 kr. Den årlige besparelse afhænger dog også af kedlens og varmtvandsbeholderens tomgangstab.

Absorbere som Sunstrip, som kan rulles sammen og er lette at transportere og montere, kan muliggøre bygning af tagintegreerede solfangere. Solfangerarealet udføres som en på stedet opbygget konstruktion i forbindelse med nybyggeri eller tagrenovering. Dette sparer inddækning samt udgiften til den del af tagkonstruktionen, der erstattes. For nybyggeri spares ligeledes rørforberedelser.

Der er stadig en udsigt til en effektivitetsforbedring. Dette

gælder især hvad angår selve opbygningen af anlæggene. Ved anvendelse af lav cirkulationshastighed (lowflow-anlæg) i forbindelse med en anden udformning af brugsvandsbeholderen, som muliggør en forøget temperaturlagdeling i lagertanken, kan forbedringer på op til 20% måske opnås. Besparelser kan også opnås på anlægsudgifterne på grund af mindre rør og seriekoblede absorbere m.m. Også forskningen i nye materialer, f.eks. nye høj-isolerende dæklag, kunne bidrage til en forbedret ydelse.

Et af de nyeste og mest lovende materialer til benyttelse bl.a. i solfangere er monolitisk silica aerogel også kaldet Airglass. Materialet består af ren kvarts og er højporøst. Alligevel er materialet gennemsigtigt. Da aerogelen har en meget lille pore-størrelse, har materialet en god varmeisoleringsevne. De væsentligste ulemper ved materialet er, at det ødelægges af vand, og at det er temmelig skørt. Materialet fremstilles endnu ikke kommercielt, men kun til udviklingsformål. Aerogelen kan produceres i Sverige af Airglass AB. I Danmark har solfangerfirmaet Søby SunIce fået eneretsaftale med Airglass AB om udvikling og fremstilling af solfangere med airglass. En første lovende prototype er opbygget og afprøvet.

Aerogelsolfangeren har en høj effektivitet og er velegnet til formål, hvor der kræves høje temperaturer, som f.eks. i fjernvarmeanlæg. Den årlige ydelse for en aerogelsolfanger vil under danske forhold ved anvendelse i en solvarmecentral uden lager og ved en temperatur på 60°C være ca. 700 kWh/m². Dette svarer til en fordobling i forhold til de højeffektive, plane solfangere, der fremstilles i dag.

Prisen på aerogelen forventes at blive så lav (ca. 150 kr./m²), at solfangeren kan fremstilles til priser, der er på niveau med de nuværende højeffektive solfangere, når produktionen af airglass er etableret i fuld skala.

Der er med benyttelse af aerogelen i solfangere tale om et teknisk gennembrud på solfangerområdet, som kan få meget stor positiv indflydelse på anvendelsen af solvarmecentraler med eller

uden sæsonvarmelagre. Danmark er klart førende på området.

I de senere år er der udviklet solvarmeanlæg, der også kan dække store dele af rumvarmebehovet. Således har forsøg med at koble solvarme på gulvvarmeanlæg vist, at der kan opnås såvel en høj ydelse som en relativ stor dækningsgrad.

Der er ingen teknologiske hindringer for en udbredelse af større brugsvandsanlæg. Prisen pr. m^2 falder ved større anlæg, da både komponenter og installation bliver relativt billigere. Samtidig bliver besparelsen større, da varmtvandsforbruget pr. solfanger kan forøges. Der er endnu relativt få erfaringer med disse anlæg.

Kendskabet til solvarmeteknologien er imidlertid generelt ringe iblandt kommunernes, amternes og boligselskabernes rådgivere, det samme gælder arkitekter. Interessen hos offentlige og selvejende institutioner og almennyttige boligselskaber har også været svækket af, at de ikke har adgang til skattebegunstigelse. Desuden har solvarmebranchen ikke mulighed for at give en ydelsesgaranti på de opførte anlæg.

Da der de senere år er sket en voksende udbygning med fjernvarmenettet i Danmark, er det blevet interessant at undersøge mulighederne for at anvende solvarme i tilknytning til fjernvarme. Den primære fordel herved er, at det er muligt at opnå billige solfangerarealer, da der ved en rationel arbejdsproces kan opsættes store arealer på en gang.

Solvarmecentraler til fjernvarme er især blevet interessante efter udviklingen af højtemperatur solfangeren. Højtemperatur-solfangeren er effektivt isoleret især ved et gennemsigtigt isolerende lag teflonfolie mellem absorber og et jernfrit, hårdet dækglas. I temperaturområdet 60-80°C er ydelsen 40-50% højere end i de almindelige solfangere.

I Sverige er der siden 1980 gennemført en række demonstrationsprojekter med solvarmecentraler fra 1300 til 4000 m^2 solfangere.

Her er det lykkedes at udvikle nye typer højeffektive og prisbillige solfangere til fjernvarme. Vigtige erfaringer med driften af det samlede solfangerfelt er også blevet indsamlet. Denne positive udvikling i Sverige har inspireret udviklingen i Danmark.

Solvarmecentraler er i dag en relativt kendt teknologi, idet der i Sverige har foregået stor udvikling på dette område. Det afgørende for den fremtidige udvikling for solvarmecentraler er imidlertid at få gjort anlæggene økonomisk konkurrencedygtige i forhold til andre former for energiforsyning.

Højtemperatursolfangeren indgår i Danmarks første større solvarmecentral i Saltum. Anlægget er på 1080 m² og opvarmer returvand til fjernvarmecentralen. Det er et såkaldt sommeranlæg, som er uden lager, og derfor af en så beskeden størrelse i forhold til det samlede varmebehov at selv maksimale ydelser fra solvarmecentralen kan forbruges på nettet med det samme.

Sådanne anlæg kan dække ca. 5% af det samlede energiforbrug i nettet. Flere anlæg af denne type er projekterede, og der er arbejdet en del med at udvikle store solfangermoduler til installation direkte på jorden.

Et alternativ til sommercentraler (solvarmecentraler uden lager) er at installere individuelle solvarmeanlæg hos brugerne. Princippet har med succes været anvendt i Åns siden 1984, hvor 42 husstande hver sommer kobles fra fjernvarmenettet. Et stort varmetab i nettet spares herved.

Hvis solvarmen skal dække en betragtelig del af vort samlede energiforbrug til opvarmning, er det nødvendigt at lagre solvarmen fra sommer til vinter. I Sverige er man kommet langt i denne udvikling, idet mange af de opførte solvarmecentraler har tilknyttet et sæsonlager. Den økonomisk optimale dækningsgrad har vist sig at være på 70-80% af det samlede varmebehov. Der er i dag dog mange problemer ved sæsonlagring, der endnu er uløste. Når disse problemer løses, vil det være et afgørende skridt for solvarmens udnyttelse.

De forskellige muligheder for varmelagring er behandlet i kapitel 5.

I dag betragtes solvarme udelukkende som et supplement til anden opvarmning. Solvarmen må dog anses for at have potentielle muligheder for at bidrage med en ikke ubetydelig andel af energiforsyningen de næste 40 år.

Solvarmens rolle i den fremtidige energiforsyning er i høj grad afhængig af muligheden for at anvende lave temperaturer i opvarmningssystemerne, idet såvel effektiviteten af solfanger som lager falder med stigende temperaturniveau. Den øgede kraftvarme-produktion kan medføre flere fjernvarmenet, hvortil der kan tilknyttes solvarmecentraler. Sammenkobling med kraftvarmesystemer kræver dog systemmæssige overvejelser for at finde den økonomiske optimale udformning og drift. Derudover kan bebyggelser ned til 100 huse forsynes med solvarmecentraler med sæsonlager, og hovedtransmissionsledningerne fra eksisterende net til bebyggelser kan spares. Solenergien vil derved kunne yde et væsentligt bidrag til energiforsyningen.

Solvarmen forventes på længere sigt, når sæsonlagring er udviklet til en kommerciel teknologi at kunne dække godt 30% af Danmarks varme- og brugsvandsforbrug.

Passiv solvarme

Passiv solvarme er udnyttelsen af solvarme til bygningsopvarmning opnået ved bygningens udformning, uden brug af tekniske anlæg. Dette opnås ved at udnytte det direkte sollys gennem:

- vinduernes størrelse, placering og type
- glastilbygninger og glasoverdækninger
- solvægge (d.v.s. glasdækkede ydervægge)
- bygningers indretning herunder varmelagrende egenskaber.

Kun få bygninger i Danmark er endnu projekterede med udnyttelse af passiv solvarme. Udenlandske erfaringer på området er vanske-

lige at overføre på grund af forskelle i klima, byggeskik og bygningsanvendelse.

De sidste års forskning på området har tilvejebragt en stor del af forudsætningerne for en hensigtsmæssig udformning af bygningerne med henblik på udnyttelse af passiv solvarme. De mest hensigtsmæssige principper til udnyttelse af passiv solvarme samt størrelsen af energitilskud fra passiv sol er nu bestemt.

Et grundlæggende princip er, at 50-100% af en bygnings vinduesareal skal være placeret mod syd, og facaden skal udformes, så den kan forsynes med glastilbygning eller solvægge. Endelig skal rum med sydvendte vinduer og glastilbygninger have tilstrækkelig varmekapacitet. Bygningen bør indrettes således, at rum, der benyttes en stor del af tiden, tilføres solvarmen (klimazoner - soverum mod nord, o.s.v.).

En væsentlig del af de nødvendige projekteringsredskaber foreligger således nu, og ideerne omkring passiv solvarmeudnyttelse er så småt ved at vinde indpas hos de projekterende.

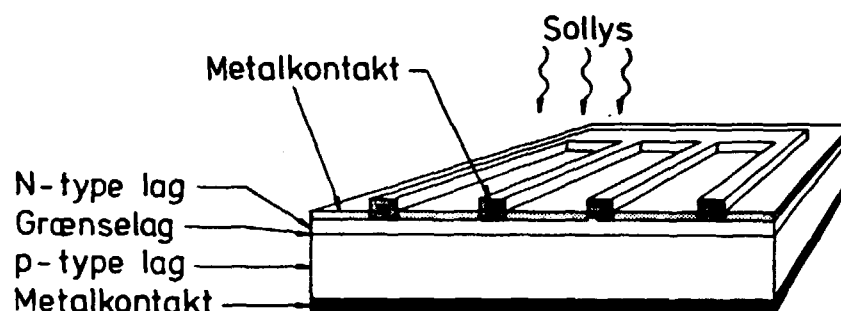
De største muligheder ligger i nybyggeriet, hvor en bevidst planlægning af vinduer og husets varmeakkumulerende evne kan bevirke en nedsættelse af varmebehovet med 25-45%.

I det eksisterende byggeri er det mest glastilbygninger og solvægge, der har været på tale. Herved kan der opnås en energibesparelse på 10-15%, og nye brugskvaliteter i boligen samt mindre facadevedligeholdelse, hvilket især er relevant i betonbyggeri.

Solceller

Solceller er en tiltrækkende elproduktionsteknologi, hvor der uden bevægelige dele sker en direkte omdannelse af sollys til elektricitet uden emissioner og med meget lidt vedligeholdelse. Endvidere kan produktionskapaciteten hurtigt udvides modulært.

Figur 3.1 illustrerer princippet i en konventionel solcelle. Cellen består af et halvledermateriale, f.eks. en silicium krystal opdelt i to lag. I disse to lag er der tilsat små kontrollerede mængder af fremmede stoffer: I det øverste er der tilsat fosfor, hvilket giver et lag med overskud af elektroner (n-type lag). Nederst er der tilsat bor, hvilket giver et lag med overskud af positive "huller" (p-type). Når disse lag bringes i kontakt med hinanden fordeler de overskydende "huller" og elektroner sig i materialet, og det ønskede elektriske felt opstår i grænselaget.



Figur 3.1. Solcelle

For- og bagsiden er forsynet med kontakter i form af passende metalbelægninger, forsiden med et åbent kontaktmønster, som tillader passage af lys ind i cellen. Forsiden er herudover belagt med et tyndt lag af materiale, som reducerer halvlederens tilbagekastning af det indfaldende lys.

Når cellen udsættes for sollys, dannes der en elektrisk spænding mellem pladerne i solcellen, og denne spænding udnyttes på almindelig vis i et strømkredsløb.

For sædvanlige silicium-solceller kan der opnås en god udnyttelse af lys i bølgelængdeområdet 400-1000 nm, svarende til hele det synlige spektrum samt en del af det nære infrarøde.

Udviklingen af solceller er baseret på den nyeste højteknologiske viden indenfor halvlederteknologi og er meget kapital-

intensiv. Udviklingen startede i 1954 på de amerikanske Bell laboratorier og er siden især foregået i USA og Japan. I løbet af et årti er industrien udviklet fra en mindre industri, der var specialiseret i at fremstille solceller til rumfartsbrug til en begyndende storindustri.

Der er sket en kraftig produktionsstigning frem til 1983, en stagnation fra 1983-85 på grund af en mætning af markedet for de første forbrugerprodukter såsom ure, lommeregnerne etc. samtidigt med at antallet af nye elproducerende anlæg i USA faldt grundet ophør af statsstøtte i USA til demo-projekter. I 1986 er der igen sket en stigning og produktionen i Japan er nu den største.

Den største markedsandel har selvforsynende systemer (52%). Til denne gruppe hører anvendelser til afsides liggende installationer såsom fyr, radiostationer, vandpumpning, køling af medicin m.m.

Den næststørste gruppe er forbrugerprodukter (36%), f.eks. ure, lommeregnerne, radioer m.m. På dette område har især japanerne været opfindsomme.

Resten (14%) er gået til offentlig støttede solcellekraftværker samt et antal mindre nettilsluttede systemer.

Markedet domineres idag af solceller fremstillet af enkrySTALLINSK silicium (45%), polykrySTALLINSK silicium (22%) samt tyndfilmceller af amorft silicium (32%).

EnkrySTALLINSKE silicium_solceller:

En enkelt enkrySTALLINSK siliciumcelle med en diameter på 10 cm har en typisk ydeevne på 1W. Til næsten alle praktiske formål må et vist antal celler derfor serie og/eller parallelforbindes i større moduler for at give en passende høj ydelse. Standard solcellemoduler fremstilles i dag oftest med ca. 35 serieforbundne celler, således at den opnåede spænding er stor nok til at kunne oplade et almindeligt 12 V batterisystem. Solcellemo-

dulet og det opladelige batteri er en fortrinlig kombination, idet ladespændingen kan opretholdes under svingende belysningsintensiteter, mens kun ladestrømmen vil variere med belysningen. En simpel spærrediode i kredsløbet vil kunne forhindre, at batteriet aflades gennem solcellerne under mørke eller meget svage belysninger.

Solcellemodulet har i dag typiske ydre dimensioner på 40 cm • 100 cm med en effekt på 35 W. De enkelte celler er monteret på et fast underlag og serieforbundet ved sammenlodning med ledninger fra den ene celledes forside til den næste celledes bagside. Modulet er herefter indkapslet under glas eller et transparent og lysægte plastmateriale med høj styrke. En hermetisk beskyttelse opnås ved afslutning med f.eks. en aluminiumsramme og et egnet tætningsmateriale, således at kun ét ledningspar er ført ud til forbrugeren eller til sammenkobling med andre moduler.

Solcellemodulet giver en stor fleksibilitet i opbygningen af større solcellearealer og udbygningen til egentlige solcellesystemer ved tilføjelse af lagringsmedier, reguleringsenheder, supplerende energiforsyninger (vind, diesel, etc.), eller eventuelt sammenkobling med et el-distributionssystem.

Solcellemoduler fra 1970'erne havde ikke altid den ønskede langtidsholdbarhed, men idag er disse problemer løst og langvarig praktisk drift samt prøvning med accelleret ældning peger på, at modulevetiden kan blive omkring 30 år. Virkningsgraden for kommercielle celler har nået 14%.

Polykrystallinske silicium solceller:

Polykrystallinske silicium solceller har fået en stigende andel af produktionen, idet den endelige dyrkning til enkrySTALLINSK silicium her spares uden en større nedgang i virkningsgraden, som i kommercielle celler har nået 14%.

Ved at slække på de strenge renhedskrav kan polykrystallinsk silicium nedbringes til en pris på en femtedel af den nuværende.

Tyndfilmceller af amorft silicium:

Tyndfilmceller af amorft silicium har haft den stærkeste vækst i produktionen siden japanerne introducerede dem kommercielt i 1980. Moduler kan fås i størrelser op til 0,5 m². Virkningsgraden i kommercielle celler har nået 6% og i laboratoriet 12%.

Solcellerne kan derfor fremstilles som tyndfilm flere hundrede gange tyndere end krystallinske celler og laves i en kontinuert proces. Herved opnås en væsentlig materialebesparelse af stor betydning for økonomien.

Det største problem for alle amorfe siliciumsolceller er at virkningsgraden reduceres med 10-15% i løbet af de første måneder, derefter stabiliserer cellen sig, for de bedste kommercielle på 6%. Denne effekt er blevet intensivt studeret og mindskes ved tyndere celler med forsidetexturering og lysreflekterende bagside.

Tandemceller, hvor lag af forskellige tyndfilm, der absorberer forskellige bølgelængder, stables ovenpå hinanden, kan nu i laboratoriet fremstilles med en virkningsgrad på 15%.

De nye resultater på tyndfilmområdet antyder en startende anvendelse til kommerciel elproduktion i 1990'erne.

Solcellesystemer kan inddeles på følgende måde:

- Mindre isolerede systemer
- Decentrale enheder
- Egentlige kraftværksenheder.

Mindre solcellesystemer kan bestå af et enkelt eller nogle få moduler, eventuelt i forbindelse med et batterilager til optagelse af døgnvariationer. Sæsonlagring er ikke praktisk mulig

med de kendte batterisystemer, og der må derfor tages hensyn til årstidsvariationerne ved en passende overdimensionering af solcellearealet. Sådanne systemer har hidtil udgjort solcelleindustriens vigtigste marked.

Solcellemoduler kan i dag leveres i specielle udformninger som tagdækningselementer, der kan indgå som en integreret del af tagkonstruktionen på nye huse. En kombination af solceller til elproduktion og solfangere til varmtvandsproduktion er ligeledes tænkelig, da solcellernes ydeevne ikke degraderes katastrofalt med stigende driftstemperatur (typ. 0,5% pr. °C for Si). Af hensyn til forsyningssikkerheden og afsætningsmuligheden for overskudsproduktion vil sådanne decentrale enheder ofte være tilsluttet et almindeligt forsyningsnet. Dette samt ønsket om at kunne benytte konventionelle elektriske apparater i boligen indebærer, at solcellesystemets jævnstrømsproduktion omformes til vekselstrøm med den sædvanlige spænding og frekvens. Omformningen kan finde sted ved hjælp af motoromformere, eller elektroniske omformere.

Central produktion af solcelleelektricitet ved egentlige kraftværksenheder kan komme på tale til forsyning af f.eks. isolerede ø-samfund eller hvor rimeligt store landarealer er billigt tilgængelige, således at et centralt anlæg bliver mere rationelt end en integration af mindre anlæg i en bestående bebyggelse.

Demonstrationsanlæg af størrelsesorden 100 kW spidseffekt er opført i USA og flere andre steder i verden. Under EF-solcelleudviklingsprogrammet (1979-83) er en række forsøgsanlæg af denne art blevet opført rundt omkring i medlemslandene. Også et dansk anlæg (100 kW peak, V. Bøgebjerg ved Skelskør) var med i den oprindelige planlægning, men blev opgivet på grund af manglende politisk vilje. Det nærmeste anlæg, som kommer til at svare til danske klimaforhold, bliver herefter en vesttysk 300kW installation på den frisiske ø Pellworm.

De største forhindringer for en hurtig udbredelse af solcelleanlæg i Danmark er: arealkrav, anskaffelsespris og lagerbehov.

Heraf er arealkravet ikke noget stort problem. Selv under danske klimaforhold vil f.eks. en husstands behov for elektrisk energi kunne opfyldes ved hjælp af solcelle-paneler på tagfladen, og indpasningen af solcelle-anlæg kan finde sted i forbindelse med nybygning og ombygning, således som det sker for solvarme-anlæg. Større arealbesparelser som følge af den teknologiske udvikling gennem de kommende 40 år kan nok ikke forventes.

Prisudviklingen forventes derimod at undergå en hastig, teknologisk betinget udvikling, resulterende i en decimering af modulpriserne inden for dette århundrede. Stor-skala udnyttelse i Danmark kan nok først komme på tale efter år 2000. En kraftig vækst vil kunne finde sted inden år 2030, med større anlæg i forbindelse med industri- og institutionsbygninger eller som selvstændige kraftværks-enheder i MW-klassen.

Behovet for lagerkapacitet vil stige med en voksende solcelle-andel af el-produktionen. Sæson-lagring af elektrisk energi kan nok ikke blive aktuel, og selv med ret store lagre vil solcelle-systemernes effekt-værdi forblive forholdsvis begrænset. Med lagerkapaciteter svarende til omkring ét døgn gennemsnitsproduktion kan der imidlertid opnås betydelige forøgelse af pålidelighed, dækningsgrad og udnyttelsesgrad, og kombination af solcelle-drift med andre former for vedvarende energi (vindkraft) kan forbedre disse forhold yderligere.

Hvis solcellesystemerne fremmes gennem tilskud og gode finansieringsmuligheder i overgangsperioden, kan Danmark i år 2030 have af størrelsesordenen 5% af sit el-behov dækket ved strøm fra solcelle-anlæg.

3.2. Energiforhold

Solvarmecentraler

Når der til et fjernvarmenet tilkobles et solvarmeanlæg vil en del af forbrugernes varmebehov kunne dækkes af solvarmen. Lige-

ledes vil solvarmen kunne bidrage til dækning af ledningsnet-
tets varmetab.

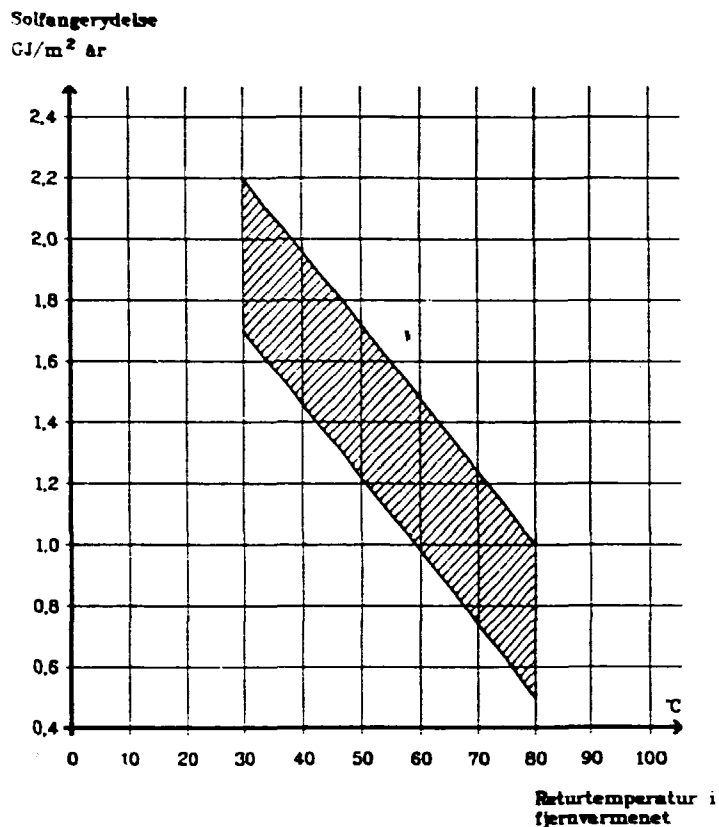
I solvarmeanlæg uden varmelager vil solvarmen kun kunne dække
det varmebehov, der er, når solen skinner, idet ledningsnettet
kun har en lagringskapacitet på omtrent 1 time. Der vil derfor
i praksis kun kunne opnås en dækningsgrad på omkring 5% ved
benyttelse af disse såkaldte sommeranlæg.

Hvis der tilkobles et korttidslager, d.v.s. et lager med en
lagringstid på 2-3 døgn, vil varmebehovet om sommeren i for-
hold til det årlige varmebehov være afgørende for, hvor stor en
dækningsgrad der kan opnås for anlægget. En årlig dækningsgrad
på 10-15% vil normalt kunne opnås i typiske fjernvarmesystemer
ved tilkobling af solvarmeanlæg med korttidslager.

Hvis solvarmeanlægget forsynes med et sæsonlager stiger dæk-
ningsgraden betydeligt. Hvis et sådant anlæg tilkobles et lav-
temperaturfjernvarmenet kan der opnås dækningsgrader op til
100%, idet rumopvarmningsbehovet i vinterperioden kan dækkes
med fremløbstemperaturer betydeligt lavere, end det traditionelt
er tilfældet.

Som det fremgår af figur 3.2 er solfangerens ydelse afhængig
af returtemperaturen i fjernvarmenettet. Jo lavere temperaturen
på returledningen er jo større bliver solfangerens ydelse, idet
det således er muligt at levere energi ved lavere temperatur.

Solfangere kan enten benytte væske eller luft som varmetrans-
porterende medium. Begge solfangertyper virker ved, at solstrå-
lingen går igennem glasset og omdannes til varme i en sort ab-
sorber. I absorberen overføres varmen til væsken eller luften,
som ledes direkte til forbrug eller til et varmelager.



Figur 3.2. Forventet solfangerydelse for de bedste anlæg tilsluttet returledning. Kilde: Forsyningskataloget.

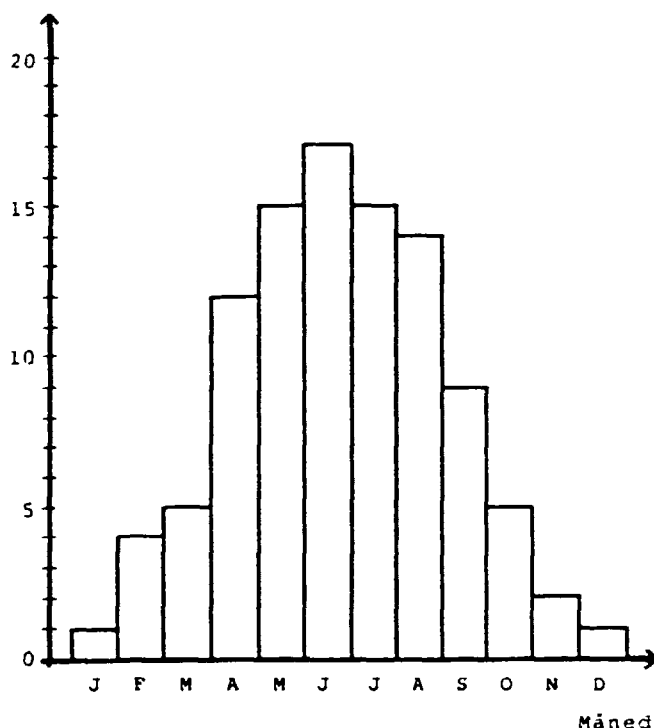
Hvis absorberen er varmere end den omgivende luft, vil der ske et vist varmetab fra den. For at mindske varmetabet isoleres absorberen på bagsiden, f.eks. med mineraluld. Ved forsiden udnyttes glassets drivhusvirkning, d.v.s. glassets evne til at lade solstrålingen passere, men holde varmestrålingen tilbage og forhindre vinden i at afkøle absorberen.

Varmetabet fra absorberen kan yderligere reduceres ved at benytte specielle belægninger på absorberen, kaldet selektive belægninger. De selektive belægninger er sorte i solstrålingsområdet og blanke i varmestrålingsområdet. De absorberer derfor næsten al solstrålingen og udsender næsten ingen varmestråling.

Generelt gælder det, at de høje ydelser ved høje temperaturer forudsætter en solfanger med selektiv overflade og en konvektionsdæmpende folie mellem glas og absorber.

Solvarmeanlæg kan om sommeren dække varmebehovet og opvarmningen af brugsvand næsten 100%, mens kun en ringe del af varmebehovet om vinteren kan dækkes af solvarme, idet varmebehovet da er stort, men antallet af solskinstimer er lille.

Fordelingen af solvarmeproduktionen fremgår af figur 3.3.



Figur 3.3. Typisk månedsfordeling af solvarmeydelsen i et normalår. Kilde: Forsyningskataloget 1988.

Den årlige solindstråling på en sydvendt flade med en hældning på 45° fra vandret er i Danmark ca. 1200 kWh/m² pr. år.

En solfangers effektivitet er defineret som det procentvise udbytte af solfangeren i forhold til solindstrålingen. Effektiviteten af solfangeren er afhængig af absorbertemperaturen, jo lavere væsketemperaturen er i solfangeren jo større bliver effektiviteten. Brugsvandsanlæggene har typisk en systemeffektivitet på lige over 0,3.

Effektiviteten ved en given absorbertemperatur er afhængig af solfangerens konstruktion, dvs. om der er et eller flere dæklag, transmissionen, absorberens udformning, overfladebehandlingens egenskaber med hensyn til absorption og varmestråling, isoleringstykkelsen og tætheden af solfangeren.

Den teoretisk opnåelige systemeffektivitet er lig solfangerens effektivitet, som i dag, afhængig af dæklagets optiske egenskaber og absorberens belægning, ligger mellem 0,8 og 0,9. Denne høje systemeffektivitet kan kun opnås, hvis solfanger, rør og lager intet varmetab har. Dette er kun muligt, hvis den ønskede brugstemperatur er lig omgivelsernes temperatur. De høje systemeffektiviteter kan således opnås i forbindelse med f.eks. opvarmning af svømmebassiner. Jo højere temperaturer der ønskes, jo større bliver varmetabet, og systemeffektiviteten falder derfor.

Solceller

Solcellens effektivitet er defineret som den brøkdel af sollysets energi, i det spektrum der når jordens overflade fra en skyfri himmel med solen stående i zenit (1000 W/m^2), som omdannes til elektricitet i cellen.

Et givet halvledermateriale vil kun kunne udnytte en vis del af solspektret. I praksis reduceres den opnåelige strøm i forhold til den ideelle værdi: En del af lyset kastes tilbage fra overfladen, en del af lyset når ikke at løsrive elektroner, mens det passerer cellen, og en del af ladningsbærerne, som skabes dybt inde i cellen, når ikke frem til grænselaget.

En forbedring af effektiviteten kan opnås ved konstruktion af tandemceller, d.v.s. to eller flere celler, med forskellige materialer, stablet oven på hinanden. Hvert af de indgående halvledermaterialer kan på denne måde udnytte sin del af solspektret, og den samlede virkningsgrad overstiger, hvad der kan opnås med et enkelt materiale.

	Nuværende niveau	Realistisk frem- tidigt niveau	Teoretisk grænse
Enkrystallinsk			
siliciumcelle	14%	17%	22%
Samme tandem	20%	40%	50%
Amorf			
silicium	6%	12%	14%
Samme tandem	9%	17%	24%

Der er for øjeblikket meget stor forskel mellem virkningsgraden opnået i laboratoriet og den reelle virkningsgrad opnået i kommercielle solceller.

For de enkrystallinske silicium solceller gælder det, at virkningsgraden for de kommercielle celler nu er oppe på 14%. I laboratoriet derimod er der opnået meget højere virkningsgrader. Således lykkedes det i 1987 på Stanford Universitetet i Californien at nå 22% ved normalt sollys (28% i 130 gange koncentreret sollys). På Sandia laboratoriet i USA blev der i 1988 sat verdensrekord, idet man ved opbygning af en tandemcelle opnåede en virkningsgrad i koncentreret sollys på 31% (23% i normalt sollys).

Denne verdensrekord er imidlertid i 1989 slået i Los Angeles ved opbygning af Boeing-cellen. Med denne er der opnået en virkningsgrad på 37%. Boeing-cellen fungerer således, at solens stråler passerer et transparent lag bestående af gallium arsen, hvorved solen absorberes og omdannes til elektricitet. Herefter passerer infrarødt lys det andet lag bestående af gallium antimon, hvorved der også dannes elektricitet. Det specielle ved Boeingcellen er netop, at det infrarøde lys omdannes til elektricitet, idet det for de fleste siliciumceller gælder, at det infrarøde lys ikke kan udnyttes.

Benyttelsestiden for solceller er afhængig af, hvor mange timer solen skinner, samtidig med at der kan benyttes elektricitet. Da elbehovet ikke er specielt solafhængigt, sættes benyttelsestiden lig antal årlige solskinstimer.

3.3. Miljøforhold

Solvarmeanlægget vil typisk erstatte en produktion af varme baseret på afbrænding af fossile brændsler og anvendelsen af solvarme medfører derfor en begrænsning af den samlede emission af luftforurenende stoffer.

Placeringen af større solfangerarealer og varmelagre i naturen kan give problemer af landskabsmæssig art og eventuelt også i relation til fredningsbestemmelser. Når solfangerne placeres på hustagene, begrænses disse problemer betydeligt. Derudover kan solfangerne placeres oven på f.eks. et damvarmelager.

Solcelleanlæg kan placeres overalt, hvor pladsen tillader det, da der ved elproduktionen hverken fremkommer affaldsprodukter, forurening eller overskudsvarme.

3.4. Økonomi

Solvarmecentraler

Solvarmecentralernes økonomi bliver bedre jo større anlæggene er. I Sverige er man så langt fremme i udviklingen af solfangerer, at prisen pr. leveret kWh varme er nede på ca. 30 øre, og der arbejdes stadig kraftigt på udviklingen af solfangerne, således at prisen pr. m² solfanger forventes at komme ned på 1.100 kr. Herved bliver energiprisen 25 øre pr. kWh.

Prisniveauet for et solvarmeanlæg i dag ligger mellem 1400 kr. og 3200 kr. pr. m^2 solfanger. Fordelingen fremgår af følgende:

	kr./ m^2 solfanger
Solfanger incl. stativ m.m.	1000-1800
Tilslutning til fjernvarmenet	200- 500
Byggemodning + evt. transmissionsledning	100- 500
Projektering, tilsyn og adm.	100- 400
I alt	1400-3200

De laveste anlægspriser gælder for meget store anlæg.

Den årlige vedligeholdelse for et korrekt udført solvarmeanlæg med langtidsholdbare komponenter er minimal. Det er dog nok rimeligt at afsætte en årlig vedligeholdelsesudgift på 20 kr. pr. m^2 solfanger.

Et anlæg som Saltum koster i dag omkring 2000 kr./ m^2 og har en ydelse på ca. 370 kWh/ m^2 ved 55°C. Investeringerne er således 5,5 kr./kWh årligt. I fremtiden vil f.eks. anvendelsen af air-glass kunne hæve ydelsen til omkring 700 kWh/ m^2 ved de samme temperaturer, og det skønnes ikke umuligt at få anlægspriser på 700-1000 kr./ m^2 , forudsat at produktionen er så stor, at der er baggrund for at opbygge den rationelt.

I dag arbejdes der på at forbedre grundlaget for dimensionering af solvarmeanlæg. Det vil resultere i mindre anlægsstørrelser, men med samme ydelse som i dag. Den bedre og mere optimale dimensionering af anlægget vil i sig selv give en reduktion i anlægsprisen.

De solvarmekomponenter, der er på markedet i dag, har alle været produceret i forholdsvis kort tid. Der må derfor med tiden ventes en prisreduktion alene som følge af optimalt materialevalg og optimalt valg af produktionsproces.

En ændring i systemudformningen, således at solvarmeanlæggen opbygges af letsammenbyggelige moduler, vil lette montagen. Dette vil dels billiggøre anlæggene, dels formindske fejlmulighederne og derved øge den gennemsnitlige ydelse fra anlæggene.

Der er således grundlag for at forvente, at det i løbet af en kortere årrække vil være muligt at lave større solvarmecentraler, der er konkurrencedygtige med traditionelle varmecentraler.

Solceller

En forudsætning for at solceller vil indgå til almindelig energiproduktion er en prisreduktion til en fjerdedel af det nuværende prisniveau.

Solceller er i dag kun økonomiske i specielle selvforsynende systemer f.eks. til afsides liggende steder. Prisniveauet ligger i dag på 4 \$/W for solcellemoduler og er således faldet væsentligt siden 1980, hvor prisen var 15 \$/W.

Fremstillingsomkostningerne for Si solcellemoduler kan naturligt opdeles efter følgende hovedprocestrin:

- Dyrkning og udskæring af krystalmateriale
- Celletilvirkningsprocesser
- Samling og indkapsling i moduler.

Hertil kommer, afhængigt af den aktuelle anvendelse, udgifter til landareal, montage, regulerings- og konverteringssystemer, etc. Efter flere års rationaliseringer af specielt de sidste to hovedtrin fremstår krystaldyrkningsprocessen og udsavningen til wafers som den mest tungtvejende udgiftspost med en andel på omkring 70% af den samlede modulpris af fabrik. For at nå de ønskede mål er det imidlertid stadig påkrævet at forbedre økonomien i alle tre procestrin.

Tidligere målsætninger fra det amerikanske energiministerium for prisudviklingen opererede med bratte prisfald ved et kommercielt gennembrud for bånd-dyrket krystallinsk silicium. Dette udeblev, men til gengæld er de polykrystallinske siliciumkvaliteter samt især tyndfilmcellerne kommet stærkt frem.

Ved en vurdering af konkurrencedygtigheden af egentlige elproducerende solcellesystemer kan man opdele på tre hovedtyper:

Afsides netuafhængige systemer. Her når den samlede pris op på 8 \$/W, men på grund af alternativernes høje omkostninger er solceller her konkurrencedygtige. De mest almindelige anvendelser er: Telekommunikation, vandpumpning, køling af vaccine, katodisk beskyttelse, sikkerhedsbelysning osv. De fleste af disse anvendelser kræver et batterilager. Indtil nu er det mest enkrystallinske celler, der er blevet anvendt til disse formål.

Mindre nettilkoblede systemer tilknyttet en lokal belastning såsom en bolig. Her kræves ikke et lokalt batterilager, men DC-AC konvertering og tilkobling til nettet. Der findes omkring 1000 sådanne anlæg i USA. Ekstraudstyret koster under 1 \$/W og den samlede investering bliver således 5 \$/W.

Prisen på solcellemoduler skal ned under 2 \$/W for at trænge ind på dette område uden statsstøtte. Dette vil formodentlig ske for tyndfilmceller i starten af 1990'erne.

For at der kan ske en væsentlig anvendelse i større elproducerende anlæg, skal man op på en virkningsgrad på 15% og en modulpris under 1\$/W. Med de nye resultater for tyndfilmceller, ser det nu ud til, at man kan nå dette mål i slutningen af 1990'erne.

3.5. Konsekvensvurdering for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af solenergi

Solenergiens rolle i det fremtidige energisystem er afhængig af muligheden for at reducere temperaturen i opvarmningssystemerne,

idet virkningsgraden for anlæggene stiger, jo lavere temperaturen bliver.

I forbindelse med kraftvarmeudbygningen er der gode muligheder for etablering af solvarmecentraler, idet der udbygges med fjernvarmenet.

Hvis solvarmen skal dække en stor del af Danmarks energibehov, er det nødvendigt at udnytte den kollektivt, d.v.s. opbygge solvarmecentraler i forbindelse med fjernvarmenet.

Det største problem ved solvarmen er, at energien især forekommer om sommeren, hvor der kun er ringe behov for energi, mens varmebehovet om vinteren er stort, og solvarmeproduktionen er da meget lav. Det vil derfor have stor betydning at kunne lagre energien fra sommer til efterår/vinter.

Når sæsonlagring kan lade sig gøre vil det være et afgørende skridt for solvarmens udnyttelse.

3.6. Industripolitiske aspekter

Med baggrund i materiale fra tilskudsordningen og fabrikantoplysninger er der skønsmæssigt etableret i alt ca. 4000 solvarmeanlæg i Danmark. I de senere år er der etableret ca. 300 anlæg pr. år. I 1989 blev der indtil 31/10 etableret 853 anlæg. Der har i perioden 1980-1988 været en eksport af solvarmeanlæg på ca. 6 mill.kr.

Fordelt efter anvendelse kan det antages (kilde: Forsyningskataloget 89), at:

- ca. 50% er brugsvandsanlæg (5m^2 i gennemsnit)
- ca. 35-40% er anlæg for både rum- og brugsvandsopvarmning (18m^2 i gennemsnit)

- ca. 10-15% er anlæg for svømmehaller m.v. og kan være kombineret til brugsvandsopvarmning (80m² i gennemsnit).

Alt i alt er der indtil nu investeret ca. 220 mill.kr. i solvarmeanlæg.

I de senere år har produktionen af solvarmeanlæg været nogenlunde konstant på trods af, at anlæggenes ydelser er forbedret væsentligt. Årsagen hertil er formentlig at selve solfangerens pris er for høj, på grund af at de fremstilles i små styktal. En ændring af markedsforholdene vil kunne ændre prisforholdene i gunstig retning.

I 1988 erstattede den ved sol producerede varme et brændselsforbrug på 0,15 PJ olie. Med en gasoliepris på 27,9 kr./GJ gav varmeproduktionen fra solvarmeanlæggene således anledning til en årlig valutabesparelse på 4,2 mill.kr.

Da solvarmeanlæg altid skal suppleres af en anden energikilde, vil etableringen af solvarmeanlæg give anledning til merbeskæftigelse. Merbeskæftigelsen forårsaget af solvarmen er ved benyttelse af nedennævnte beskæftigelseskvoter beregnet til 712 personår.

	Importkvoter	Beskæftigelse personår pr. invest. mill.kr.
Oliefyr	24%	3,1
Brugsvandsanlæg	20%	3,4
Rumopvarmning	23%	3,2
Svømmebadsopvarmning	26%	3,2

Kilde: Forsyningskataloget, 1988.

Importbehovet ved fremstilling af solvarmeanlæg er i det væsentlige begrænset til import af råvarer, idet alle komponenter, der indgår i anlægget, for øjeblikket fremstilles i Danmark.

	Virkning af solvarme- investering i Danmark	Eksport
	(Mill.kr.)	(Mill.kr.)
Eksport af solvarmeanlæg		6
Importindhold i salg	-52,4	-1,2
Sparet import til oliefyr	0	
Valutaindtægt	-52,4	4,8

Af ovennævnte tabel fremgår det, at der er en valutaudgift på 47,6 mill.kr. som følge af investeringen i solvarmeanlæg. hertil skal dog lægges den årlige valutabesparelse på 4,2 mill.kr. som følge af oliesubstitutionen.

Solceller er en teknologi, der typisk vil blive importeret fra USA, hvor udviklingen foregår.

3.7. Fremtidig forskning og udvikling

Solvarmecentraler

Solvarmeteknologien er i dag en relativ veludviklet teknologi, men energiprisen for solproduceret varme er så høj, at solvarmecentraler endnu ikke er konkurrencedygtige med ordinære varmecentraler. En fremtidig udvikling bør derfor medføre en reduktion i energiprisen.

Energiprisen kan reduceres ved:

- Forbedret ydelse
- Optimal materialeanvendelse
- Bedre systemløsninger
- Installationsvenlighed.

En prismæssig reduktion kan yderligere gennemføres gennem et større salg, idet dette vil formindske produktionsomkostningerne.

Anvendelsen af aerogel-solfangere kan få meget stor positiv indflydelse på anvendelsen af solvarmecentraler med eller uden sæsonlagre.

Der er især behov for at støtte den vanskelige proces, det er at kommercialisere anvendelsen af aerogelen. Dette kan gøres ved følgende aktiviteter:

- generel forskning og udvikling vedrørende anvendelsen af aerogeler i solfangere. Der er behov for eksperimentelt og beregningsmæssigt arbejde med henblik på udvikling af effektive og holdbare konstruktioner, der kan fremstilles til rimelige prisniveauer. Aktiviteter på området er iværksat, men langtidsegenskaber er endnu ukendte.
- opbygning af fuldskala produktionsudstyr på såvel aerogel-siden som på solfangersiden. Det nuværende produktionsudstyr er ikke stort nok. Der er behov for risikovillig kapital til etablering af produktionsanlæg, der kan klare en produktion med en realistisk pris og en tilstrækkelig god kvalitet. Investeringsbehovet er ca. 25 mio.kr.
- opførelse af fuldskala forsøgsanlæg og demonstrationsanlæg. Disse kan udover at tjene som referenceanlæg give et grundlag for den første produktion af aerogelsolfangere på et kommercielt niveau.

Da solenergien er sæsonbestemt er det afgørende for at solvarmecentraler mærkbart kommer til at indgå i energiforsyningen, at der udvikles billige lagertyper til opbevaring af varmen. De i dag kendte lagre er så dyre, at de ikke udgør et realistisk alternativ til traditionel opvarmning. Der findes imidlertid lagertyper, der endnu er på forsøgsstadiet, men som med stor sandsynlighed på længere sigt vil kunne fremstilles til en pris, der vil gøre solvarme med sæsonlagring til et konkurrencedygtigt alternativ til traditionel opvarmning. Et væsentligt tiltag der bør tages for at fremme anvendelsen af solvarmecentraler er derfor en udvikling af lagringsteknikken.

Solceller

To områder indenfor solcelleteknologien, der endnu kræver udvikling for at solcelleanlæg vil indgå i energiplanlægningen er:

- Forbedring af solcellens effektivitet
- Prisudvikling.

En forbedring af solcellens og dermed solcellesystemers effektivitet gennem en teknologisk udvikling kan foretages på følgende måder:

- Videreudvikling og optimering af siliciumceller
- Anvendelse af andre og bedre egnede halvledermaterialer
- Udnyttelse af andre, allerede kendte eller endnu upåagtede principper.

I alle tre tilfælde er det vanskeligt at forudsige, hvor meget det kan betale sig at investere i en effektivitetsforbedring.

Derimod er det en forudsætning for fremtidig anvendelse af solceller til almen energiproduktion, at prisen for solceller reduceres. Dette kan foretages gennem følgende udviklingsarbejde:

- Nedbringelse af materialeomkostninger
- Forøgelse af produktionskapacitet
- Reduktion af fremstillingsomkostninger eller udvikling af fremstillingsteknologier specielt udviklet til solcelleformål.

Solceller har mange fordele: Modular opbygning, ingen bevægelige dele, potentiel lang levetid og ingen umiddelbare miljøproblemer. Der kræves imidlertid som nævnt en væsentlig teknologisk udvikling for at hæve effektiviteten og sænke prisen. Med en fortsat stor international forskningsindsats, er det rimeligt sandsynligt, at solceller vil nå de forventede mål omkring århundredeskiftet.

3.8. Datablad

Teknologi: Solvarmecentraler (1000 m²) uden lager
(her Saltum-anlægget)
(sommercentraler)

Input : Sol

Output : Varme, varmt vand

	1988	2000	2015	2030
Effektivitet (%)	30	60	60	60
Dækningsgrad (%)	5	10	10	10
Ydelse (MWh)	370	740	740	740
Levetid (år)	20	20	25	25
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kWh)	5,5	2,7	2	1,5
Årlige driftsomkostninger (kr./kWh)	0,07	0,04	0,02	0,02
Returtemp. i fjernvarmenet (°C)	55	50	40	30

Solfangerens ydelse beregnes bl.a. ud fra returtemperaturen i fjernvarmenettet. Årsagen til den kraftige stigning i effektivitet er, at aerogeler forventes indført. Deraf følger faldet i investering fra 1988 til 2000.

Teknologi: Solvarmecentraler (1000 m²) med korttidslager

Input : Sol

Output : Varme

	1988	2000	2015	2030
Solfangereffektivitet (%)	30	60	60	60
Korttidslagereffektivitet (%)	90	90	90	90
Dækningsgrad (%)	10	20	20	20
Ydelse (MWh)	370	740	740	740
Levetid (år)	20	20	20	20
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kWh)	13	9,5	8	8
Årlige driftsomkostninger				
(kr./kWh)	0,12	0,08	0,05	0,05
Returtemp. i fjernvarmenet (°C)	55	50	40	30

Solfangerens ydelse beregnes bl.a. ud fra returtemperaturen i fjernvarmenettet. Årsagen til den kraftige stigning i effektivitet er, at aerogeler forventes indført.

Investeringen for et korttidslager forventes at falde med 20% inden år 2015.

Teknologi: Solvarmecentraler (1000 m²) med sæsonlager

Input : Sol

Output : Varme

	1988	2000	2015	2030
Solfangereffektivitet (%)	30	60	60	60
Sæsonlagereffektivitet (%)	70	70	75	75
Dækningsgrad (%)	70	75	80	80
Ydelse (MWh)	370	740	740	740
Levetid (år)	20	20	20	20
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kWh)	11	4	2,5	2
Årlige driftsomkostninger (kr./kWh)	0,10	0,05	0,04	0,03
Returtemp. i fjernvarmenet (°C)	55	50	40	30

Solfangerens ydelse beregnes bl.a. ud fra returtemperaturen i fjernvarmenettet. Årsagen til den kraftige stigning i effektivitet er, at aerogeler forventes indført.

Følgende sæsonlagre er indsat: 1988 Damvarmelager

2000 Borehulslager

2015 Aquiferlager

2030 Aquiferlager.

Prisudviklingen i tidsperioden er forårsaget af stigende effektivitet samt benyttelsen af forskellige lagre. Investeringerne for lagrene forventes at kunne reduceres med 30% inden år 2030.

Teknologi: Solceller (Enkrystallinske silicium solceller)

Input : Sol

Output : Elektrisk energi

	1988	2000	2015	2030
Effektivitet (%)	14	15	17	20
Benyttelsestid (timer/år)	1500	1500	1500	1500
Levetid (år)	30	30	30	30
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kW)	30.000	10.000	10.000	10.000

De årlige driftsomkostninger vil være minimale og opgives derfor ikke.

4. BØLGEENERGI

Havets bølger udgør en betydelig energiresource, som sammenlignet med andre fornyelige energikilder har en relativ høj energitæthed. Eksempelvis er den gennemsnitlige energitæthed for havets bølger på årsbasis op til 100 kW pr. meter bølgefront i visse dele af verden.

Havet dækker 70% af kloden, og vinde, som blæser over et havområde, skaber bølger. Når vinden blæser med en konstant styrke over et stort havområde, vil bølgerne vokse til et vist punkt, derefter bliver de ikke større. Der er skabt en balance mellem vind og bølger. Havet er en stor vindenergiabsorber, og i form af bølgeenergi kan den absorberede energi føres langt omkring.

Anlægges en strækning med bølgeenergimaskiner, vil disse kunne nyttiggøre en del af den energi, som bølgerne ellers først ville frigøre langs kysterne. Når bølgerne falder ind mod rækken af bølgeenergimaskiner, bliver bølgenes bevægelser omformet til anden mekanisk energi, som kan producere f.eks. strøm. På den anden side af bølgeenergimaskinerækken vil bølgerne være langt mindre, og havoverfladen vil næsten se ud som på en vindstille dag. Først efter 50-100 km vil vinden igen have skabt bølger så store som før.

I det følgende kapitel vil adskillige bølgeenergianlæg blive omtalt, mens behandlingen m.h.t. energiforhold, miljøforhold, økonomi etc. kun vil omfatte Kim Nielsens bølgeenergimaskine, da det er denne, der i dag er aktuel på dansk område.

4.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering

Der findes i dag en hel række forskellige koncepter til udnyttelse af bølgeenergi. Specielt har der i Norge pågået udvikling af metoder og anlæg til udnyttelse af bølgeenergi siden slut-

ningen af 1970'erne. Som et resultat af dette er der udviklet 4 forskellige udgaver af bølgekraftanlæg, der vil blive beskrevet i det følgende. Derudover vil et anlæg udviklet i Skotland blive beskrevet.

Svingende kraftbøje

Den svingende kraftbøje består af en kugle, som er åben forneden, og som kan glide op og ned langs en stang fæstnet til havbunden. Kuglen flyder på havoverfladen og svinger således i takt med de indkomne bølger. Når bølgen svinger, fremkommer der vekslende tryk i den indelukkede luft inde i kuglen. Disse trykvariationer udnyttes til at drive en luftturbine, som er koblet til en elektrisk generator.

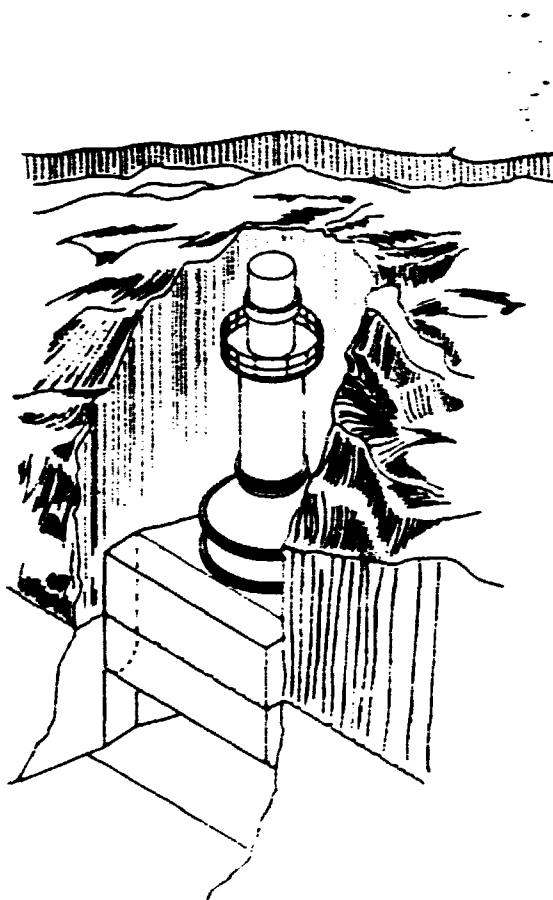


Figur 4.1. Svingende kraftbøje

Bøjen optager mest energi, når den styres således, at den går op midt i en bølgedal. Dette opnås ved hjælp af en sensor- og reguleringsstyring, der foretager den rigtige fasestyring.

Svingende vandsøjle

I den svingende vandsøjle benyttes samme princip som i den svingende kraftbøje. Blot er det her vandet, der benyttes som det svingende medium. Anlægget består af en bundfast stål- eller betonkonstruktion med indebygget strømproducerende maskineri.



Figur 4.2. Svingende vandsøjle

Hoveddelen af konstruktionen er et svingkammer, som står i forbindelse med havet via en neddykket åbning. De indfaldne bølger vil sætte vandsøjlen i kammeret i svingninger. Vandsøjlen vil

veksle mellem at skyde luft ud og suge luft ind gennem en luft-turbine, som driver en elektrisk generator.

Fokuserende bølgekraftværk

Det fokuserende bølgekraftværk tager sigte på at koncentrere bølgeenergien ved hjælp af en bølgelinse i et fokalområde på samme måde som et brændglas samler lys i et brændpunkt. I fokalområdet placeres en konverteringsenhed, som omsætter bølgeenergien til potentiel energi ved at løfte vand op i et bassin på land. En almindelig hydroelektrisk kraftstation udnytter vandet i bassinet til produktion af elektrisk energi.



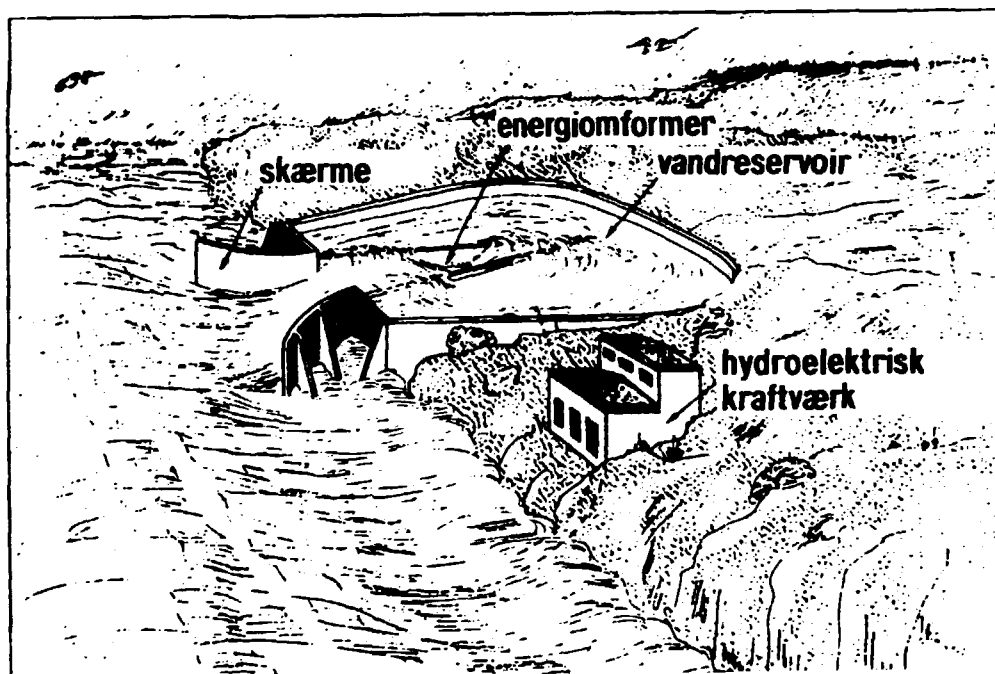
Figur 4.3. Fokuserende bølgekraftværk

Det fokuserende bølgekraftværk er bedst egnet for store kraftstationer på over 100 MW.

Kilerendekraftværk

Kilerendekraftværket er i al enkelthed et fokuserende bølgekraftværk uden bølgelinse. I kilerendekraftværket møder de ufor-

styrrede havbølger konverteringsenheden, kilerenden, og ledes ind i denne. I kilerenden bliver bølgen presset sammen, således at bølgetoppen bliver højere end den øvre horisontale kant på renden. Vandet strømmer derfor over i indtagsmagasinet til kraftstationen, som genererer elektrisk energi på konventionel vis.



Figur 4.4. Kilerendekraftværk

I det fokuserende bølgekraftværk og i kilerendekraftværket består alle de enheder, der er placeret på havet eller er i kontakt med havbølgerne af passive elementer. Konverteringen til elektrisk energi sker på land med turbiner og generatorer af samme slags, som benyttes i konventionelle vandkraftværker. Dette forenkler drift og vedligeholdelse væsentligt og reducerer driftsudgifterne til et minimum.

Salter Ducks

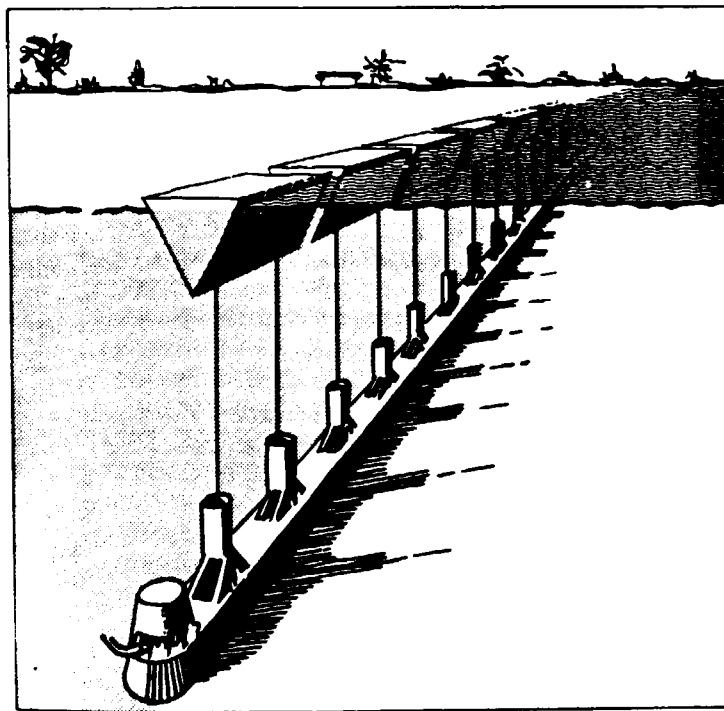
Et af de mere kendte bølgeenergisystemer er "Salter Ducks", udviklet af professor Salter i Scotland. Princippet for hans design er baseret på et antal specielt udformede kamme, de så-

kaldte ænder, placeret på en fælles aksel, om hvilken de vipper, drevet af bølgerne. Den relative bevægelse mellem aksel og ænder kan således udnyttes til optagelse af energi.

Ovennævnte bølgeenergisystemer må opfattes som eksempler, idet der er udarbejdet adskillige andre koncepter.

Kim Nielsens bølgeenergimaskine

I Danmark har der de sidste 10 år været forsket i bølgeenergi, og der er nu blevet udviklet en bølgeenergimaskine af civ.ing. lic.techn. Kim Nielsen. Denne bølgeenergimaskine sætter ved hjælp af bølgenes bevægelser en turbine og en generator igang, som producerer elektricitet.



Figur 4.5. Kim Nielsens bølgeenergimaskine

Bevægelserne i bølgerne bliver opfanget af en række bøjer, som ligger lige efter hinanden. Der er fire bøjer i hver maskine. Hver bøje er forbundet til to wirer, som er gjort fast til nogle

store stempelpumper. Bølgenes bevægelse påvirker stemplerne, som er gjort fast til et langt betonrør, der står på havets bund. Hele maskinen er forbundet til dette rør.

Stemplet trækkes opad, samtidig med at bølgerne topper. Hver gang stemplerne bevæger sig opad, trækkes der vand gennem turbinen, som er placeret i den ene ende af røret. Dette sikres ved hjælp af kontraventiler i pumpen. Fra turbinen og generatoren bliver den producerede energi derefter ledt til land ved hjælp af et elkabel.

Bølgemaskiner kan medføre en begrænsning i havområder såvel til kommerciel brug som for lystsejls.

Endnu er teknologien på forsøgsstadiet, men en fortsat indsats med hensyn til udvikling af teknologien virker lovende. Det forventes dog ikke, at bølgeenergi er en teknologi, der er kommerciel tilgængelig før efter år 2000.

Der er i Danmark udarbejdet et atlas over energiresourcerne i Nordsøen og i de indre danske farvande. Et skøn viser, at der i bølgerne er et energipotential på 25.000 GWh. Det synes realistisk, at Danmark kan udnytte 20% af denne bølgeenergi. En sjettedel af Danmarks nuværende elforbrug kan således dækkes ved bølgeenergi.

4.2. Energiforhold

Energiindholdet i bølger på åbent hav er ganske betragteligt. Ud for Norges vestkyst ligger det årlige middel på 20 kW pr. meter bølgefront, og ud for Hebriderne er energiindholdet omkring 50 kW pr. meter bølgefront om året. I danske farvande er energiindholdet betydeligt lavere, 2-6 kW pr. meter bølgefront årligt i Kattegat.

Den samlede virkningsgrad, der kan opnås, vil ligge i interval-

let 25-30%. Nyttevirkningsgraden ved transmission af elektriciteten ligger på 80%, mens hele bølgeenergimaskinen kan forventes at være i funktion 98% af tiden.

Bølgeenergimaskinens benyttelsestid er defineret som den tid, maskinen producerer el, der kan benyttes i elsystemet.

4.3. Miljøforhold

Når bølgenes bevægelse er omformet til mekanisk energi i bølgemaskinen, vil havoverfladen på den anden side af bølgemaskinen være som på en vindstille dag. Vinden vil først efter 50-100 km have skabt bølger så store som før bølgemaskinen. Som følge af, at bølgeenergimaskinen vil dæmpe bølgerne noget, vil der ske en mindre opblanding af overfladevand og bundvand. Dette kan medføre et forstærket iltsvind på havbunden i perioder med næringssaltproblemer og algeopblomstring.

Bølgemaskiners bundkonstruktion er funderet direkte på havbunden. Som forankringsbidrag til funderingen kan indgå sugevirkning imellem bundkonstruktion og havbund, etableret ved en filterkonstruktion i bundpladen af pumperøret. Når stemplet hæves, vil der således opstå en sugeseffekt mellem funderingskonstruktionen og havbunden. Dette kan imidlertid medføre erosion af havbunden, og der bør derfor foretages geotekniske undersøgelser af havbundsforholdene på den lokalitet, hvor bølgeenergimaskinen tænkes placeret.

Herudover kan bølgeenergimaskinen som følge af nedbrydningen af bølgerne ved kysterne hindre erosion af kysterne. Der bør derfor foretages en helhedsvurdering, før en større udbygning finder sted.

4.4. Økonomi

Til vurdering af økonomien i bølgeenergi har der været udført be-

regninger på en udviklet bølgeenergimaskine tilpasset Nordsøen.

Med baggrund i forsøgsresultater fra modelforsøg vil en bølgeenergimaskine på 420 kW have en årlig middeldydelse på 133 kW, hvilket giver en årlig energiproduktion på 1.141.700 kWh.

Den samlede investering i en 420 kW bølgeenergimaskine udgør 5.712.000 kr. Investeringerne er fordelt således:

Konstruktion:

6 bøjer	á 42 m ³ beton	(2.000 kr./m ³)	504.000 kr.
12 stempler	á 6 m ³ beton	(2.000 kr./m ³)	144.000 -
12 wirer	á 30 m, Ø 50 mm	(150 kr./m)	54.000 -
24 ventiler		(10.000 kr./stk)	240.000 -
Kanalrør og pumper,	810 m ³ beton	(2.000 kr./m ³)	1.620.000 -
			<u>2.562.000 kr.</u>
Turbine og generatorer			1.310.000 -
Transport og udlægning			840.000 -
Eltransmission			<u>1.000.000 -</u>
Samlede omkostninger			<u>5.712.000 kr.</u>

Som det fremgår af ovenstående, udgør selve konstruktionen af bølgeenergimaskinen ca. det halve af omkostningerne.

De årlige udgifter er beregnet til 428.000 kr. ud fra en afskrivning af den samlede investering over 20 år med 5% realrente. Herudover skal der regnes med en årlig vedligeholdelse på 50.000 kr., hvorved de samlede årlige udgifter bliver 478.000 kr.

Med en årlig produceret energimængde på 1.141.700 kWh bliver energiprisen således 42 øre/kWh.

Ved Hanstholm afprøves p.t. (ultimo 1989) et bølgeenergianlæg på 250 kW. Energiprisen er her beregnet til ca. 60 øre/kWh, men på længere sigt anses det for muligt at nå ned på omkring 40 øre/kWh.

4.5. Konsekvensvurdering for det samlede elsystem ved benyttelse af bølgeenergi

Danmarks årlige bølgeenergipotentiale er opgjort i et bølgeenergiatlas i 1985. Bølgeenergipotentialet er vist i nedenstående tabel.

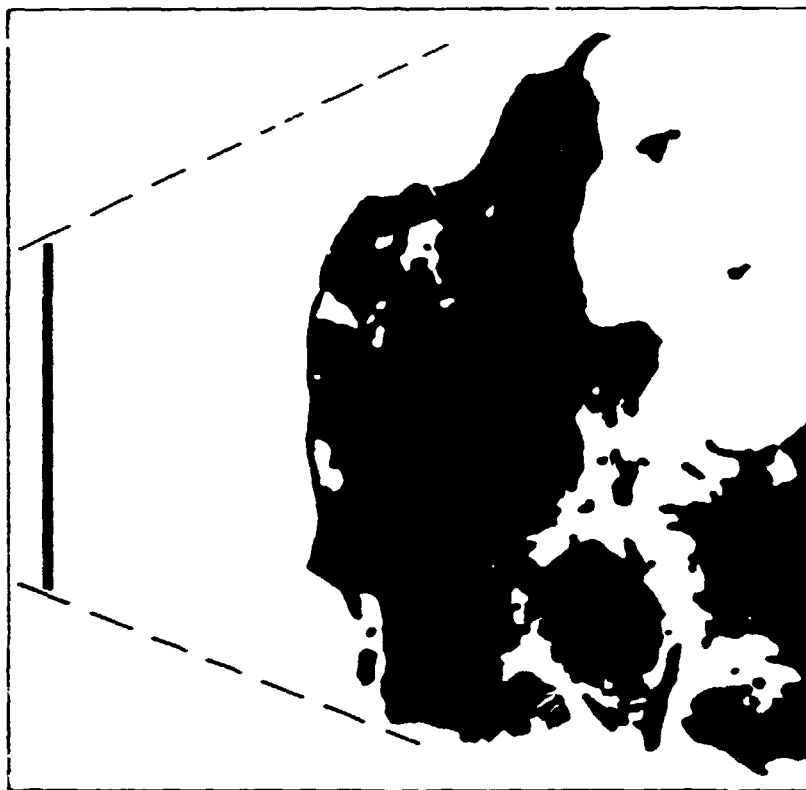
	Strækning	Årlig middeleffekt	Årlig energi
Nordsøen	200 km	10.0 kW/m	63 PJ/år
Kattegat	115 km	2.8 kW/m	10 PJ/år
Bornholm	50 km	2.8 kW/m	4 PJ/år
Ialt			77 PJ/år

Hvis bølgeenergimaskinerne tilpasses en bestemt bølgelængde, kan 100% af energien i bølgerne absorberes. Det vil dog teknisk set være mere realistisk at designe for et bredere spektrum, således at flere bølgelængder kan udnyttes. Den samlede virkningsgrad kan herved blive 10-30%. Der regnes med, at en udnyttelse på 10% vil være realistisk på kort sigt, mens virkningsgraden på lang sigt må påregnes at være 30%. Herved vil potentialet blive som følgende:

	År 2000	År 2015	År 2030
Nordsøen	6 PJ/år	12 PJ/år	18 PJ/år
Kattegat	1 PJ/år	2 PJ/år	3 PJ/år
Bornholm	0,4 PJ/år	0,8 PJ/år	1 PJ/år
Danmark	~ 7 PJ/år	~ 15 PJ/år	22 PJ/år

Danmarks elforbrug var i 1988 30 TWh. Bølgeenergien vil således i år 2030 kunne dække 20% (22 PJ = 6 TWh) af Danmarks 1988-forbrug. Dette vil imidlertid kræve 1700 420 kW-bølgemaskiner á 100 meters længde, svarende til en strækning på 170 km.

Figur 4.6 viser en tænkt anlagt strækning på 165 km bølgeenergi-maskiner i Nordsøen, som netop er et attraktivt område for bølgekraftværker. I 30-50% af tiden vil der ikke kunne hentes noget væsentligt ud af bølgeenergimaskinerne, mens der på andre tidspunkter vil finde en overdækning sted. Det vil derfor være nødvendigt at kombinere teknologien med et ellager, hvis det skal have nogen væsentlig betydning for fremtidens elforsyning.



Figur 4.6. Tænkt strækning på 165 km anlagt for bølgeenergi-maskiner

4.6. Industripolitiske aspekter

Bølgeenergi er endnu en ny teknologi, der forskes i mange steder i verden. Mange forskellige systemer er efterhånden afprøvet. I Danmark afprøves Kim Nielsens bølgeenergimaskine indenfor de næste år. Viser denne bølgeenergimaskine sig at være en succes i forhold til andre afprøvede koncepter, vil det kunne resultere i en eksport af tilsvarende anlæg til udlandet. De kostbare dele

af anlægget består dog mest af beton, og disse dele vil øjensynligt blive bygget i udlandet. Opbygning af anlæg i udlandet vil dog kræve ekspertise fra Danmark, hvilket vil resultere i en dansk merbeskæftigelse.

4.7. Fremtidig forskning og udvikling

Den fremtidige udvikling må sigte på at gøre bygning af bølgeenergikraftværker til et realistisk energiforsyningsalternativ med en energipris på omkring 40 øre/kWh.

For at nå dette mål skal et korttids energilager udvikles, og den årlige energiproduktion skal forbedres bl.a. ved at udnytte et gunstigt interferens mønster mellem bøjerne samt evt. udnytte en fasestyring af flyderne i forhold til bølgerne.

Praktiske erfaringer er nødvendige, og et pilotforsøg skal gennemføres.

Et pilotforsøg forventes over en drift- og måleperiode på ca. 2 år at kunne bidrage med viden, som er nødvendig i den videre udvikling. Dette kan være viden om forhold som

- Materialevalg
- Udlægning
- Drift og vedligehold
- Slid på konstruktionsdele
- Begroning og indvirken på marint miljø
- Energiproduktion i bølger under reelle forhold.

Den forskning og udvikling, som skal foregå parallelt med forsøgene har til formål, at nedbringe prisen på 60 øre/kWh væsentligt.

De områder, som kan bidrage til en reduktion af udgifterne, skal udforskes og optimeres, og de områder, som kan øge den årlige energiproduktion uden yderligere anlægsinvesteringer, skal afprøves.

Udviklingen vil naturligt indebære yderligere modelforsøg, samt teoretisk og numerisk analyse af de kræfter, som optræder og virker i samspillet mellem bølge, flyder og stempelpumpe.

Ved bedre dimensioneringsmetoder kan bundkonstruktionen gøres billigere.

Hvis et simpelt korttidsenergilager kan udvikles, som er i stand til at udjævne strømmingen gennem turbinen, så kan den installerede effekt reduceres, og middeldydsen på årsbasis kan måske forbedres.

Flydernes indbyrdes placering skal nærmere udforskes og optimeres. Et gunstigt interferensmønster kan øge energiabsorptionen med en faktor 1.3 i bestemte bølgelængder.

Et vellykket pilotforsøg kan åbne mulighed for et demonstrationsanlæg i Nordsøen, med 100 eller 200 stk bølgeenergimaskiner koblet til en fælles platform.

Ved en driftsperiode i Nordsøen kan der endelig tages stilling til finansiering og bygning af et stort bølgeenergi kraftværk i perioden omkring århundredeskiftet.

4.8. Datablad

Teknologi: Bølgeenergi (Kim Nielsens bølgeenergimaskine 250 kw)

Input : Bølger

Output : Elenergi

	1988	2000	2015	2030
Effektivitet (%)	0	10	20	30
Benyttelsestid (timer/år)	0	2200	2700	2900
Levetid (år)	0	20	20	20
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kW)	0	16.000	13.500	13.500
Årlige driftsomkostninger (kr./kWh) 2%	0	0,09	0,07	0,07

**Teknologi: Kim Nielsens bølgeenergimaskine med pumpekraftlager
(250 MW)**

Input : Bølger
Output : Elenergi

	1988	2000	2015	2030
Bølgemaskineeffektivitet (%)	0	10	20	30
Pumpekraftværkseffektivitet (%)	0	72	75	75
Benyttelsestid (timer/år)	0	5100	5600	5800
Levetid (år)	0	20	20	20
Emissionsfaktorer	0	0	0	0
Investering (kr./kW)	0	21.000	18.000	18.000
Årlige driftsomkostninger (kr./kWh)	0	0,11	0,09	0,09

5. VARMELAGRING

Varmelagring i forbindelse med fjernvarmesystemer og individuelle vandbaserede opvarmningssystemer anvendes i forskellige former i dag. Formålet hermed er at afkoble varmeproduktionen fra varmeforbruget med henblik på at reducere den nødvendige installerede effekt. Som eksempler herpå kan nævnes varmtvandsbeholdere i enfamiliehuse i forbindelse med oliegasfyringsanlæg og varmelagre i forbindelse med solvarmeanlæg. I større skala er der i forbindelse med flere fjernvarmeværker og kraftvarmeværker etableret lagertanke for varmt vand. Et varmelager giver en vis frihed i tilrettelæggelse af el- og varmeproduktionen. I andre tilfælde kan det være optimalt kun at køre kraftvarmeværket i en del af døgnets timer, og i den resterende del af tiden trække varmen fra lageret.

De eksisterende varmelagre er alle korttidslagre til belastningsudjævning inden for døgnet eller nogle få døgn. Med henblik på udnyttelse af energikilder, der varierer over længere tidsrum, eller hvor produktionen er uafhængig af forbruget - spildvarme, solvarme om sommeren - kan langtidslagre komme på tale, såkaldte sæsonlagre.

Yderligere kan varme lagres i forskellige kemiske lagre.

5.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering

SMÅ VARMELAGRE

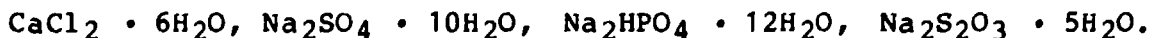
Små varmelagre benyttes typisk i individuelle huse i forbindelse med udnyttelsen af tidsmæssigt varierende energikilder, f.eks. solvarme. Desuden anvendes mindre lagre til varmt brugsvand i næsten alle huse i forbindelse med centralvarmeanlæg.

Varmefyldelagre

Varmefyldelagre er karakteriseret ved, at det stilleliggende varmelagrende medie, typisk vand, tilføres varme, hvorved temperaturen stiger. Da lagertemperaturen er højere end den omgivende temperatur, vil denne lagringsform være forbundet med varmetab. Varmefyldelagrene benyttes i dag næsten udelukkende i form af vandtanke til varmtvandsforsyningen i en boligs varmeanlæg. Disse varmelagre vil ikke blive behandlet nærmere, da det i dag er en udviklet teknologi uden videre betydning for det samlede el- og energisystem.

Smeltevarmelagre

Smeltelagre udnytter et materiales afgivelse eller optagelse af varme under henholdsvis størkning og smeltning. For uorganiske salthyrater er smeltevarmen per volumenhed særlig stor, og de uorganiske salthyrater er derfor velegnede som lagermedium. (Et salthyrat er salt med krystalvand. Saltet har den egenskab, at det ved afkøling ved en vis temperatur, smeltepunktet, binder vandet til sig i krystalgitre under afgivelse af en stor varmemængde, krystallisations- eller smeltevarmen. Tilføres krystallerne varme igen, smelter de ved smeltepunktstemperaturen under optagelse af smeltevarmen. Ved varmelagringen anvendes således smeltevarmen, som både optages og afgives ved smeltepunktstemperaturen.) Smeltevarmelagrene har en stor varmelagringskapacitet i et snævert temperaturinterval omkring smeltepunktet, og lagrene kræver derfor mindre plads og dermed mindre isolering end vandlagre. Lagrene er imidlertid temmelig komplekse og derfor endnu meget kostbare. Smeltevarmelagre er først og fremmest velegnet til korttidslagring. Lagrene er endnu på forskningsstadiet herhjemme. Omtrent 10 firmaer i udlandet (hovedsageligt amerikanske) markedsfører smeltevarmelagre. Næsten alle lagrene er baseret på uorganiske salthyrater. De mest anvendte salthyrater er:



Smeltevarmelagre kan blive økonomisk attraktive i.f.t. vandlagre, men der kræves yderligere udviklingsarbejde, før dette mål nås.

Kemiske lagre

I forbindelse med sæsonlagring frembyder den kemiske varmelagring (her en kemisk varmepumpe) to meget væsentlige fordele: Den ene er energitætheden, der er op til 10 gange større end for vandlagre. Den anden fordel er, at energien kan lagres tabsfrit så længe som ønsket. Princippet i kemisk varmelagring er at forbruge overskudsvarme (f.eks. solvarme) til en varmekrævende, reversibel kemisk proces, og derefter lade processen forløbe baglæns under varmeudvikling, når der er behov for varmen. Ved at adskille reaktionsprodukterne, forhindres den varmeudviklende proces i at forløbe. Reaktionsprodukterne kan desuden lagres ved omgivelsernes temperatur, på den måde opnås en tabsfri lagring af energien.

Den kemiske varmepumpe vil kunne udføres med en maksimal effekt-afgivelse indenfor vide grænser og vil derfor sammen med et lager af passende størrelse kunne udføres til individuelle såvel som kollektive anlæg. Der vil blive tale om et anlæg, der i høj grad anvender kendte processer. Det må antages, at der til styring og hjælpeapparater skal bruges elektrisk energi svarende til 5-10% af den omsatte varmemængde.

Der mangler stadig et stort udviklingsarbejde, før den kemiske varmepumpe kommer på markedet. Når problemerne løses, kan denne lagringsmåde blive økonomisk fordelagtig i forhold til dagens vandlagre.

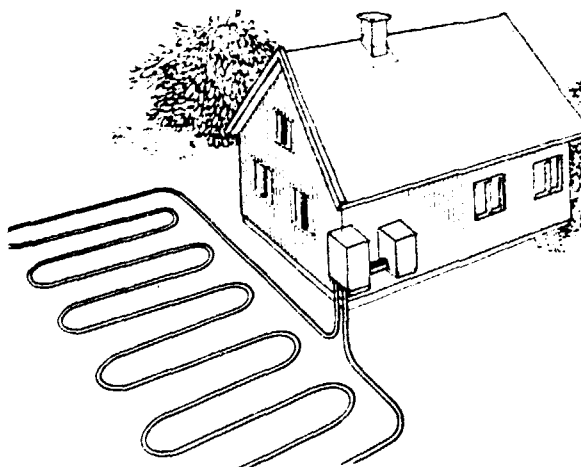
STORE VARMELAGRE

I Danmark dækkes en ret betydelig del af opvarmningsbehovet ved hjælp af fjernvarme. I en del tilfælde kan der her være behov for store termiske energilagre knyttet til fjernvarmesystemerne. Ved benyttelse af disse lagre kan belastningen af fjernvarme-

værkerne udjævnes, og det kan blive muligt at udnytte spildvarmen produceret på tidspunkter med lavt varmekonsum. Lagrene kan være korttidslagre eller sæsonlagre, lavtemperaturlagre eller højtemperaturlagre.

Varmelagring i jord

Varmelagringen i jord foregår ved, at der ved opgravning lægges slanger ned i jorden, hvorigennem der ledes væske. Slangerne kan lægges såvel horisontalt som vertikalt. Ved varmelagringen afgiver væsken varme til jorden, der derved kommer til at virke som varmelager. Ved genvinding af varmen afgiver jorden igen sin varme, der optages af væsken i slangerne. Da det er den omkring slangerne liggende jord, der fungerer som varmelager, kræves der ingen vægge omkring lageret. Det kan dog være nødvendigt at anbringe en plastmembran i nedstrømside af lageret for at forhindre, at varmen ledes bort fra lageret.



Figur 5.1. Varmelager i jord

Varmelagring i jord benyttes i dag som korttidslagre ved lavere temperaturer (mindre end 30°C), hvor den genvundne varme kan anvendes ved hjælp af varmepumpe. Der findes således i dag et dansk firma, der fremstiller lagre af denne type.

At udnytte jorden på denne måde til sæsonlager er mere problematisk, idet det her vil være nødvendigt at isolere både sider og top i lageret for at holde på varmen. Specielt isoleringen af siderne indebærer tekniske vanskeligheder. Lagrene etableres derfor som mindre lagre, der ikke benyttes som sæsonlagre.

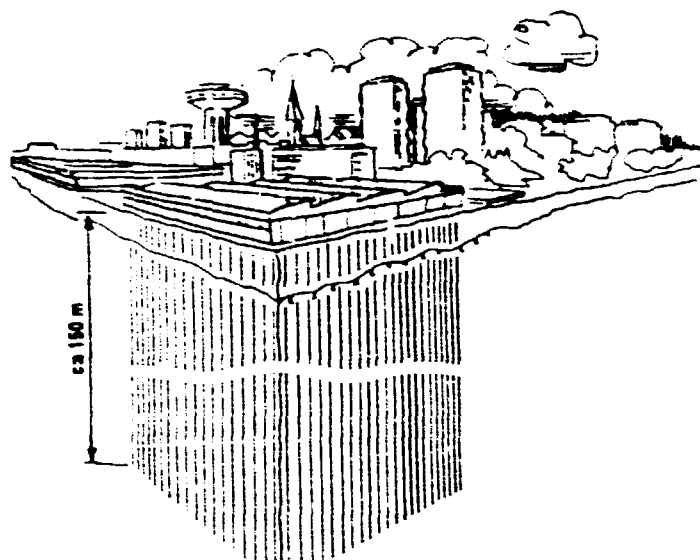
Med hensyn til udnyttelse af jordvarmelagring i forbindelse med højere temperaturer er der behov for en nøjere undersøgelse af, hvordan lagrene vil opføre sig ved langvarig opvarmning til høje temperaturer.

Borehulslagre

Ved borehulslagre lagres varmen i den omkring borehullerne beliggende jord. Ved etablering af lageret bores der en række huller i jorden inden for et afgrænset område. I hullerne monteres sammenhængende dobbelte rørslinger, således at alle borehullerne er forbundet. Ved lagring ledes varme gennem rørslingerne, hvorved varmen afgives til jorden. Ved tilbagelevering af varmen afgiver jorden sin varme til væsken i rørslingerne, og varmen i væsken kan derved udnyttes. Et lager af denne type kan vanskeligt isoleres mod siderne, hvorfor teknikken fortrinsvis er anvendelig ved meget store lagre, hvor forholdet mellem rumfang og overflade er så gunstigt, at varmetabet bliver uden væsentlig betydning. Lageret skal således være af størrelsesordenen minimum 50.000 m³ for at opnå relativt små varmetab.

Den afgørende undersøgelse ved projektering af borehulslagre vil være at fastslå omfanget af den tværs på boringen forekommende grundvandsstrøm. I alle morænelerforekomster vil vandstrømmens størrelse være uden økonomisk betydning. I områder med sand kan vandstrømme af betydelig størrelse forekomme, og teknikken vil derfor være uegnet, da varme her vil ledes bort med grundvandet.

Da det ikke er prohibitivt, men tværtimod ønskeligt, at jordlagene er vandfyldte (bedre varmekapacitet), og da overordentlig mange mulige placeringer af lagre vil rumme moræneler, vil borehulslagre normalt kunne udføres næsten alle steder i Danmark.



Figur 5.2. Borehulslager

Det væsentligste driftstab er varmetabet fra lageret. Dette lagertab er mest afhængig af lagerets geometri, og borehulslageret er derfor fordelagtigt, idet lageret, dersom jordbundsforholdene tillader det, kan udføres ved en stor dybde. Herved begrænses varmetabet.

Ved store lagre større end 500 MWh er varmetabet mellem 10% og 30% af beholdningen, afhængig af systemets temperaturniveau. Lagre mindre end 500 MWh vil medføre øgede tabsprocenter især ved høje temperaturniveauer og lange lagertider. Da varmevekslereffekten ved borehulslagre er beskeden, og afstanden mellem borehullerne ikke i praksis kan være mindre end ca. 1,5 m (af økonomiske grunde vil den snarere være større), må cyklustiden for et borehulslager være 1000 timer eller mere. Der er således ingen muligheder for at anvende borehulslagre til korttidslagring.

Ståltanke

Den i dag mest velkendte lagringsteknik, der anvendes i Danmark, er lagring i vandfyldte isolerede ståltanke. Prisen er imidlertid så høj, at teknikken ikke er interessant i forbindelse med

sæsonlagring. Derimod kan den være interessant i forbindelse med korttidslagring, hvor der opnås flere lageromsætninger om året, og derved en bedre økonomi.

Det er muligt at udføre tanken som en tryktank, men det kan ikke anbefales dels på grund af begrænsninger af størrelsen, dels på grund af de store krav, der stilles til pladekvalitet, pladetykkelse og arbejdets udførelse. Bedre er det med en trykløs tank, der samtidig kan fungere som ekspansionstank for fjernvarmenettet.

Varmeakkumulatoren skal for at opnå den bedste funktion helst udføres med en stor højde og et lille tværsnit. Dette er i reglen svært at tilgodese på grund af ønsket om et stort volumen. Det bør dog tilstræbes, at højden bliver ca. 1,5 gange diameteren.

Under op- og afladning af varmeakkumulatoren tilføres henholdsvis afledes det varme vand af fremløbstemperatur i toppen, mens der samtidig afledes henholdsvis tilføres en tilsvarende mængde vand af returtemperatur i bunden af akkumulatoren.

Det varme og det kolde vand holdes adskilt på grund af vægtfyldeforskellen. Grænselaget mellem det varme og det kolde vand bestemmes af flere faktorer:

1. Forholdet mellem akkumulatorens højde og diameter.
2. Tiden mellem opladning og afladning.
3. Vandhastighed gennem akkumulatoren.

Ved en passende dimensioneret varmeakkumulator vil grænselaget kunne holdes på ca. 1 m.

Vandhastigheden i selve varmeakkumulatoren vil normalt være lille. Derimod gælder det om at dimensionere ind- og udløbsarrangementerne således, at vandet fordeles jævnt i akkumulatoren, og at hastigheden sænkes mest muligt i ind- og udløbsarrangementerne.

Den optimale isolering af varmeakkumulatoren må beregnes i hvert enkelt tilfælde, idet denne påvirkes af flere faktorer som f.eks. akkumulatorens volumen, temperaturen på det lagrede vand, tiden mellem op- og afladning og prisen på den anvendte energi.

Det skal dog bemærkes, at en dårlig isolering påvirker tykkelsen af grænselaget mellem det kolde og det varme vand i akkumulatoren i ugunstig retning.

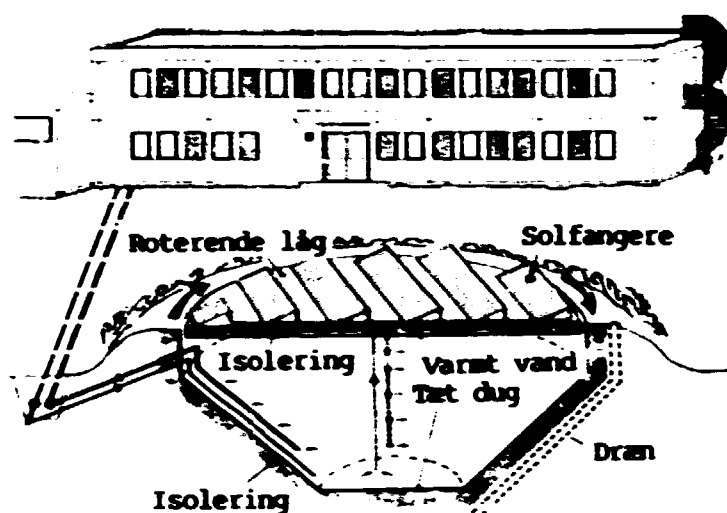
Damvarmelagre

Damvarmelagre kan etableres på steder, hvor grundvandsspejlet er dybtliggende. Princippet i damvarmeanlægget er, at der etableres en dam med eller uden isoleringsmateriale mellem lageret og det omkringliggende jordvolumen, idet der drages nytte af dette jordvolumens termiske karakteristisk og isoleringsevne. Lageret er forsynet med et svømmende isoleret låg.

Den optimale sidehældning på damvarmelageret vil ud fra en varmetabsmæssig betragtning være 2:1. Denne hældning vil dog ikke kunne realiseres under alle jordbundsforhold i Danmark. Er det muligt på det aktuelle sted at bygge et lager med sidehældning nær 2:1, vil lageret under visse temperaturforhold kunne modtage varme fra det omkringliggende jordvolumen i vinterperioden.

Denne termiske karakteristisk af jordvolumenet omkring sæsonlageret, at det i varmelagringsperioden (vinteren) kan virke som en uendelig god termisk isolator og endda virke som varmekilde til lageret under visse forhold, er af væsentlig betydning for et termisk damvarmelager.

Man bør dog i denne sammenhæng ikke glemme, at der stadig er et varmetab gennem topafdækningen. Dette varmetab kan dog begrænses rimeligt, idet det drejer sig om at anvende isoleringsmaterialer på en konstruktionsdel over jord.



Figur 5.3. Damvarmelager

For helhedens skyld må det også oplyses, at der i sommerperioden, hvor lageret oplades, sker varmetab gennem lageroverfladen mod jord. Men da dette tab foregår i den periode, hvor varmekilden er aktiv, er dette uden større betydning ud fra et sæsonlagringssynspunkt. Økonomisk set bør det dog tages i betragtning.

Klippehulelager

Højtemperaturvarmelagring i uisolerede klippehuler er en stor-skalateknik for såvel korttids- som langtidsudjævning af varme-produktion. Denne type lager er udviklet på baggrund af svensk minebrydningsteknik og har vist sig at være meget velegnet ved meget store lagre, hvor overfladen er så lille i forhold til volumenet, at isolering af lageret er unødvendig. På grund af varmetabet og økonomi bør lageret mindst være af størrelsesordenen 500.000 m³. Klippehulelageret er dog ikke særlig anvendeligt i Danmark på grund af jordbundsforholdene.

Aquiferer

Danmark er næsten overalt dækket af istidsaflejringer med porøse, vandfyldte lag, aquiferer. En billig metode til lagring af

store mængder varmeenergi kan derfor være at udnytte disse grundvandsreservoirer som varmelagre.

At udnytte grundvandsmagasiner i jord og bjerg til varmelagring medfører det mindste indgreb i undergrunden. Dette lagringssystem er samtidig det billigste. Brøndopbygningen for ind- og udtag af vand er kendt fra grundvandsteknik, men der må tages højde for vandkemiske problemer ved høje lagringstemperaturer. Aquiferlagre er også velegnede til dobbeltudnyttelse med køle- og varmelagring henholdsvis sommer og vinter.

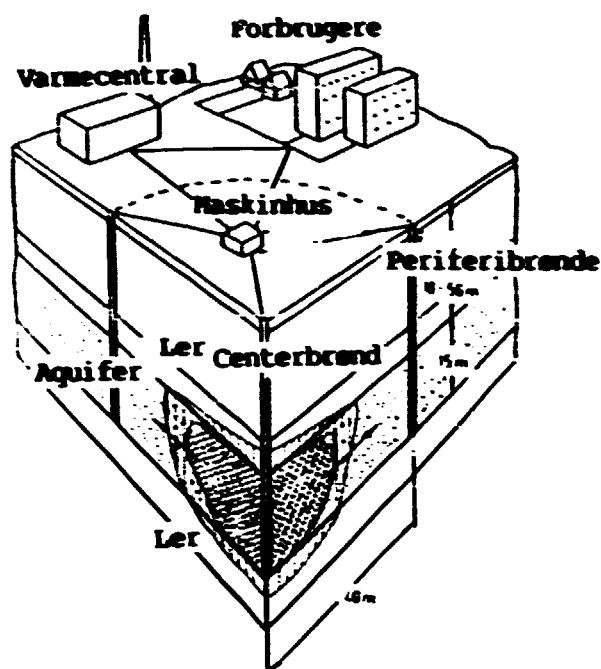
For at belyse de praktiske vanskeligheder for kommerciel udnyttelse af aquiferer som termiske lagre, skal teknikens grundprincipper kort beskrives:

Et termisk grundvandslager etableres ved udførelse af et antal boreriger til en egnet aquifer, der befinder sig så tæt ved jordoverfladen som muligt. Grundvandet oppumpes fra aquiferen og opvarmes eller nedkøles ved varmeveksling med energikilden, hvorefter grundvandet ledes tilbage til lagring i reservoiret. Energiindholdet i det nedpumpede grundvand overføres ved varmeveksling til reservoirets sand-/grusmatrix.

Effektiviteten af denne varmeveksling styres af en lang række parametre, men er primært afhængig af reservoirets fysiske egenskaber (permeabilitet, porøsitet, reservoi-højde) samt flow-rate, mængde og temperatur af det nedpumpede grundvand.

Efter lagring vendes pumperetningen, og energiindholdet i det indvundne grundvand, der er blevet opvarmet eller afkølet ved varmeveksling med reservoirets sand-/grusmatrix, kan nu udnyttes.

Cirkulationen af grundvandet gennem pumper, rør og varmevekslere har vist sig at give anledning til udfældning af de i grundvandet opløste stoffer, overvejende Fe- og Ca-forbindelser.



Figur 5.4. Aquifervarmelager

Udfældninger, der udelukkende er forårsaget af grundvandscirkulationen, kan dog oftest undgås ved en korrekt udførelse af anlægsinstallationerne.

Mere problematisk er det imidlertid med de udfældninger, der alene skyldes opvarmningen/afkølingen af grundvandet.

Ved opvarmning og afkøling forskydes den kemiske ligevægt af opløste stoffer i grundvandet, og ved temperaturer over 60°C kan det eksempelvis udfældes calciumcarbonat (CaCO_3), hvis der er calciumioner til stede i grundvandet. Udfældet calciumcarbonat vil meget hurtigt kunne tilstoppe varmevekslere, borer og andre tekniske installationer, hvis der ikke foretages én eller anden form for vandbehandling.

Med baggrund i de hidtidige erfaringer må højtemperatur varmelagring ($> 40^\circ\text{C}$) i aquiferer endnu vurderes at være på udviklingsstadiet, mens lav temperatur systemer f.eks. i forbindelse med varmepumpe drift må vurderes at kunne være kommercielt og

teknisk attraktivt på steder, hvor de geohydrologiske og geokemiske forhold er tilfredsstillende. Der eksisterer dog ingen lavtemperatur grundvandsvarmelagre i Danmark endnu.

På verdensplan har der endnu kun været 3 højtemperatur aquifer-varmelagringsanlæg, hvoraf Hørsholm Varmelager har været det ene. Alle højtemperaturanlæggene er endnu på forsøgsstadiet.

Sæsonvarmelagring er en afgørende forudsætning for, at solvarmen kan vinde frem, idet solvarmen således kan lagres fra om sommeren hvor solen skinner, til efterår/vinter hvor der er behov for varmen, men der er få solskinstimer.

Derudover vil varmelagring have betydning ved udbygningen af decentral kraftvarme i det danske energisystem.

Der findes i dag adskillige demonstrationsanlæg og flere kommercielle anlæg, men der er stadig mange driftsproblemer ved anlæggene. Problemerne gør sig specielt gældende indenfor højtemperaturområdet. Der opbygges flere og flere højtemperaturanlæg, og med de derved opnåede erfaringer vil såvel højtemperatur- som lavtemperaturvarmelagring sandsynligvis være kommerciel tilgængelig efter år 2000.

5.2. Energiforhold

SMÅ VARMELAGRE

Den varmemængde, som benyttes ved opladning af varmelagre under varmeproduktionen udnyttes normalt ikke 100%, idet der under lagringsperioden tabes varme fra lageret. Varmetabet fra et varmelager udtrykkes normalt som produktet af lagerets varmetabskoefficient K , og temperaturdifferencen mellem lageret T_1 og omgivelserne T_0 : $K \cdot (T_1 - T_0)$.

Varmetabet og dermed varmetabskoefficienten for varmelageret er sammensat af transmissionstabet gennem isoleringsmaterialet og

tabet fra alle gennembrydninger gennem isoleringsmaterialet. Der kan f.eks. være tale om gennembrydninger i form af rørtilslutninger, beholderfastgørelser, følere og lignende.

Målinger har vist, at varmetabet ved gennembrydninger gennem isoleringen ofte er stort i forhold til transmissionstab. En hensigtsmæssig udførelse og placering af kuldebroerne kan dog begrænse varmetabet til et rimeligt niveau.

Ovennævnte forhold gælder for varmfyldelagre og smeltevarmelagre, mens der er mulighed for at lagre tabsfrit ved hjælp af kemiske lagre og delvis ved faseændringslagre.

STORE VARMELAGRE

Et varmelagers virkningsgrad er defineret som forholdet mellem lagret og genvundet energi. Virkningsgraden er afhængig af flere parametre:

- Varmelagerets middeltemperatur
- Varmelagerets størrelse
- Antal cykler varmelageret har gennemgået
- Fjernvarmenettets returtemperatur.

Virkningsgraden for et varmelager afhænger af middeltemperaturen, idet varmetabet fra lageret bliver større, jo højere lagringstemperaturen er. Derudover er virkningsgraden afhængig af lagerets størrelse, idet et større lager har et mindre overfladeareal i forhold til varmeindholdet og dermed et relativt mindre varmetab.

For at varmelageret overhovedet kan udnyttes, skal grundvandet varmes op til fjernvarmenettets returtemperatur. Det vil sige, at varmelagerets virkningsgrad i de første år bliver meget lav, da en væsentlig del af den lagrede energi medgår til at bringe lageret op på minimumstemperaturen, fjernvarmenettes returtemperatur. Jo lavere returtemperaturen er, jo højere vil virkningsgraden af varmelageret i de første cykler blive.

Lagervirkningsgraden udtrykker forholdet mellem genvundet og injiceret varmemængde, begge målt i forhold til naturlig grundvandstemperatur. I realiteten kan varmen ikke genvindes ved temperaturer lavere end fjernvarmeanlæggets returtemperatur, hvorfor denne temperatur er mere hensigtsmæssig som reference for genvundet og injiceret energi (systemvirkningsgraden). I systemer, hvori der indgår en varmepumpe, kan varmen genvindes ved temperaturer under returtemperaturen.

Lager- og systemvirkningsgraden for et varmelager i undergrunden vil typisk være 0,75 for et dansk fjernvarmesystem (80°C fremløbstemperatur og 56°C returtemperatur), dog vil systemvirkningsgraden være betydeligt lavere så længe hele lageret endnu ikke er opvarmet til returtemperatur på 56°C.

Det vil ofte være nødvendigt at iværksætte en målrettet indsats for at forbedre systemvirkningsgraden for at få god økonomi i et højtemperaturvarmelager. Denne indsats kan rettes mod:

- . sænkning af returtemperaturen,
- . øgning af lagringstemperaturen - lagervirkningsgraden vil falde, men systemvirkningsgraden vil stige.

Virkningsgraden for de forskellige store varmelagre er udregnet til følgende:

<u>Lagertype</u>	<u>Virkningsgrad</u>
Jordvarmelager	0,60
Borehulslager	0,70
Ståltank	0,90
Damvarmelager, isoleret	0,85
Damvarmelager, uisoleret	0,70
Klippehulelager	0,80
Aquifer	0,75

Det må bemærkes, at ovennævnte virkningsgrader er teoretisk udregnede virkningsgrader, der i flere af tilfældene endnu ikke er bevist i praksis.

5.3. Miljøforhold

Varmelagring er en ren teknologi, der ikke medfører emissioner. Tværtimod kan emissioner undgås ved at lagre tidligere produceret varme frem for at producere varme ved olie, kul eller gas påny. Andre miljømæssige forhold kan dog være forbundet med varmelagring, hvilket vil blive beskrevet i det følgende.

SMÅ VARMELAGRE

De miljømæssige forhold er normalt ikke knyttet til lageret men til det anlæg, hvori lageret indgår. For smeltevarmelagre og kemiske lagre må man dog være opmærksom på de miljømæssige forhold ved valg af lagerudformning og varmelagermateriale. En læk i de kemiske lagre kan medføre kemisk forurening af grundvandet.

STORE VARMELAGRE

Anlæg til varmelagring skal godkendes af Miljøstyrelsen efter Miljølovens §11. Anvendelsen af rent vand i lagerkredsen for dam- og jordvarmelagre er derfor fordelagtig - forudsat at kredsen er lukket. Åbne lagerkredse vil kræve tilsætningsstoffer til vandet, og dette vil måske medføre miljøproblemer, hvis ikke lækager er forhindret af indbyggede plastfolier.

Jordvarmelager

Varmelagring i et jordvolumen via lodrette eller vandrette varmeslanger vil kræve jordbundsforhold med ringe grundvandsbevægelse. Arealkravet ved jordoverfladen vil være lille, idet det meste af arealet ved jordoverfladen over lageret vil kunne anvendes frit. Miljøbeskyttelsen må tilgodeses som ved andre fjernvarmekomponenters indbygning.

Borehulslager og klippehulelager

Disse underjordiske varmelagre vil teknisk set kunne placeres overalt og vil kun beslaglægge ubetydelige arealer ved jordoverfladen.

Ståltanke

For tanke over jord vil indplaceringen i landskabet kunne volde problemer, idet tankene ofte vil forekomme at være store og høje bygningsværker. For stål- og betontanke har man hidtil set bort fra miljøproblemer i forbindelse med en lækage.

Damvarmelager

Vanddamme nedgravet i jord kan principielt placeres overalt, hvor regions- og lokalplanerne tillader det. I områder med kraftigt strømmende grundvand vil man dog altid være nødsaget til at totalisolere lageret.

Benyttes lageret i en solvarmecentral, er toparealet dog ikke "spildt", idet der her kan placeres solfangere. Da vandet i den lukkede lagerkreds må holdes adskilt fra jordlagene, er miljøbeskyttelsen tilgodeset.

Aquiferer

Ved varmelagring i aquiferer står det opvarmede vand i direkte forbindelse med det omkringliggende grundvand, og det er derfor en betingelse ved valg af lagerplacering, at man ikke kommer i konflikt med drikkevandsforsyningen.

Det må derfor sikres, at der ikke finder vandindvinding sted inden for en vis afstand fra anlægget. Problemet kan undgås ved at udnytte et grundvandsreservoir, der ikke står i hydraulisk forbindelse med det reservoir, hvorfra vandindvindingen foregår.

Temperaturen i reservoiret antages ikke at give problemer med

hensyn til ændret bakterievækst.

En eventuel vandbehandling må så vidt muligt foregå uden at ændre vandets kemiske sammensætning. Da der ikke på nuværende tidspunkt er færdigudviklet metoder til løsning af f.eks. kalkudfældningsproblematikken, har miljømyndighederne ingen generelle retningslinier i forbindelse hermed endnu.

Ikke desto mindre er der stærk afstandstagen fra tilsætning af fremmedartede kemikalier, såsom kompleksdannere. Disse økonomisk attraktive alternativer til vandbehandling afvises på det kraftigste, da man frygter en mobilisering af tunge metaller i grundvandsmagasinet eller en bakterievækst.

Ved højtemperaturvarmelageret i Hørsholm er der dog fra Miljøstyrelsens side givet tilladelse til at give det oppumpede grundvand en saltsyrebehandling, hvorved kloridindholdet i grundvandet vil blive øget. Tilladelsen er givet under den forudsætning at udbredelsen bliver holdt under nøje kontrol ved et kloridanalyseprogram i reservoiret og med den begrundelse, at vandmængden om nødvendigt kan bortpumpes. Miljøstyrelsen vil ikke fremtidigt være indstillet på at give tilladelse til saltsyrebehandling eller eventuelt tilsætning af andre stoffer, hvis det ikke med sikkerhed kan dokumenteres, at grundvandsmagasinerne ikke bliver forurenede.

Reelt bliver resultatet af syretilsætningen, at Cl^- -koncentrationen stiger. For varmelageret i Hørsholm er der beregnet en stigning fra 30 mg/l til 180 mg/l. Den størst tilladte Cl^- -koncentration i drikkevand er 300 mg/l, og derfor skulle denne stigning ikke frembyde nogle miljømæssige problemer. Der er dog det problem ved den sure vandbehandling, at Ca^{++} ikke fjernes. Såfremt der bliver tilsat for meget syre, vil der blive opløst mere kalk, når det behandlede vand atter kommer ned i undergrunden. Hvis denne proces gentages, vil Ca^{++} -koncentrationen efterhånden vokse. Dette problem vil dog kun være aktuelt for grundvand med en ekstrem høj koncentration af SO_4^{--} .

Ved opvarmning af grundvandet op til ca. 40°C vil der sandsynligvis ikke ske kalkudfældning, og vandbehandling vil ikke være nødvendig. Der vil ikke umiddelbart finde nogle kemiske reaktioner sted i grundvandet, der kan give anledning til miljømæssige problemer.

5.4. Økonomi

SMÅ VARMELAGRE

I dag benyttes næsten udelukkende varmfyldelagre i form af vandtanke som varmelagre. Andre former for varmfyldelagre, smeltevarmelagre og kemiske lagre er endnu ikke på markedet, og det er meget vanskeligt at skønne prisen for sådanne lagre. Fremstillingsprisen for ståltanke varierer meget fra fabrikant til fabrikant. Blandt andet afhænger prisen af kvaliteten af overfladebehandlingen og isoleringen.

Installations- og driftsomkostningerne for lagrene afhænger helt af de anlæg, hvori lagrene installeres.

STORE VARMELAGRE

Sæsonvarmelagerets problematik er, at det kun benyttes 1 gang om året (1 opladning og afladning pr. år). Dette fører til, at lagrene skal være billige for at den lagrede energi kan konkurrere prismæssigt med energi produceret på traditionel vis. Da de fleste af sæsonvarmelagerkoncepterne er nye, er det vanskeligt at fastlægge varmelagringprisen med stor nøjagtighed.

Driftsudgifter for varmelagrene skønnes at være 2-10% af anlægsudgiften hvert år i levetiden. Levetiden vil være forskellig for de enkelte delkomponenter i lagrene. Lagrene vil således ikke have nogen veldefineret levetid, men middellevetiden skønnes at være 20 år.

Varmelagrenes økonomi er stærkt afhængig af, i hvilket system

(varmekilder og varmeproduktion) varmelageret udnytttes. Lagrene er dyre at etablere, hvilket medfører høje kapitalomkostninger, der skal betales ved lave driftsomkostninger i det samlede varmesystem.

Varmelager	m ³ ·1000	Temp. °C	Anlægsomk. kr./r ³	Invest. kr.pr.kWh	Kapitalomk. ører/kWh
Ståltank	20	100-50	450	7,7	45
Damvarmelager	20	80-20	390	5,6	37
Klippehulelager	300	100-50	170	2,9	19
Borehulslager	600	100-50	34	1,1	9
Aquifer	1000	16- 2	6	0,6	6

Kapitalomkostningerne er beregnet ud fra en 6% årlig rente over en 20 års periode. Omkostningerne, der her er vist, er for de angivende lagerstørrelser og temperaturintervaller. Der må bemærkes, at anlægsomkostningerne afhænger af lagerstørrelsen. Ligeledes afhænger investering pr. kWh af temperaturniveauet.

Ud fra en økonomisk synsvinkel er grundvandsreservoirer i dag et af de mest lovende medier for langtidslagring af større termiske energimængder.

5.5. Konsekvensvurdering for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af varmelagring

På grund af varmetabskarakteristikken vil termiske sæsonvarmelagre give den bedste økonomi som delkomponent i kollektive anlæg.

Inden for boligopvarmningsområdet er potentialerne for anvendelse af sæsonlagring følgende:

1. Solvarmecentraler med sæsonlager og evt. varmepumpe, som forsyner et boligområde med fjernvarme.

2. Sæsonlager tilknyttet et fjernvarmenet (evt. via en varmepumpe), hvor opladning af lageret foretages med spildvarme.
3. Sæsonlager tilknyttet et kraft-varmeværk.

Det bør tilføjes, at flere af de nævnte lagre også med fordel kan anvendes som korttidslagre f.eks. i forbindelse med kraft-varmeværker, forbændingsanlæg, industrioverskudsvarme med ujævn varmeproduktion m.v.

Ved systemændringer vil der være en væsentlig sandsynlighed for at kunne drage fordel af sæsonlagre. De i denne sammenhæng mest interessante systemændringer er følgende:

1. Varmegrundlaget udvides. Kraft-varmeværket vil således ikke være i stand til at levere den dimensionerede andel af den samlede varmeleverance, og det vil derfor være nyttigt med et sæsonlager, hvorfra der kan ydes varme om vinteren.
2. Nyetablering af kraft-varmesystemer. Kraft-varmesystemet kan dimensioneres under hensyntagen til et sæsonlager, der kan yde varme i vintermånederne. Kraft-varmesystemet kan derved optimeres.
3. Udskiftning af ældre produktionsenheder. Ældre produktionsenheder kan udskiftes når som helst, idet der under udskiftningsperioden kan ydes varme fra lageret.

På længere sigt vil en eventuel udvidelse af kraft-varmens andel af det samlede opvarmningsbehov skabe et meget gunstigt grundlag for benyttelse af sæsonlagre.

5.6. Industripolitiske aspekter

Større varmelagre er endnu ikke en kommerciel teknologi noget steds i verden, men Danmark har fulgt udviklingen nøje bl.a. med egne demonstrationsanlæg.

De store varmelagre vil være lagre, der opbygges i de respektive lande, og de fleste indgående komponenter er komponenter, der kan købes i størstedelen af den industrialiserede verden. Et gennembrud i teknologien fra dansk side vil derfor ikke medføre nogen betydningsfuld eksport af industriprodukter, men det vil kunne medføre salg af know-how til andre lande.

5.7. Fremtidig forskning og udvikling

SMA VARMELAGRE

Korttidslagre i form af simple vandlagre findes i næsten alle brugsvandsanlæg og i en række anlæg til rumopvarmning, samt på visse fjernvarmeanlæg.

Stålvandtanke, som markedsføres i dag, produceres i stort antal, og de anvendes i mange forskellige systemer. Tankene er således ikke specielt designet til de anlæg, hvori de skal indgå. Det må forventes, at udviklingen vil medføre, at varmelagre udformes specielt til de systemer, hvori de skal indgå, f.eks. solvarmelagertanke, varmepumpelagertanke til brugsvand o.s.v. Der kan blive tale om at anvende alternative varmelagringstyper, varmelagringsmaterialer og beholdermaterialer, at udnytte temperaturlagdeling i varmelageret i stor udstrækning og at forbedre udformningen af lagerets rørforbindelser, isolering, kuldebroer, opvarmnings- og tappesystem. Endvidere kan der blive tale om at forbedre styringer af lageret og optimeringsgrundlaget for lagerudformningen, f.eks. med hensyn til lagerstørrelse.

Smeltevarmelagrene vil først og fremmest kunne anvendes som korttidslagre. Der udestår endnu meget udvikling, før det kan afgøres, om smeltevarmelagrene bliver økonomisk attraktive.

Med hensyn til de kemiske varmelagre mangler der ligeledes et stort udviklingsarbejde, før disse kommer på markedet. Hvis de udestående problemer med disse lagre kan løses, og ved et seriøst udviklingsarbejde kan såvel kemiske lagre som smelte-

varmelagre i visse sammenhænge blive mere attraktive end traditionelle vandlagre.

STORE VARMELAGRE

Den eneste veludviklede lagerteknik til sæsonlagring i dag i Danmark er isolerede ståltanke.

Jordvarmeslanger nedlagt i jorden kan i dag betragtes som en gennemprøvet og veldokumenteret teknik. Et mindre jordvolumen (1000 m^3) benyttes som lager, og lageret kobles til varmepumpe, idet lagringstemperaturen er lav. Hvis jordvarmelageret skal benyttes som sæsonlager med stort jordvolumen (100.000 m^3), opstår der problemer med isolering af sider og top. Specielt isolering af siderne indebærer tekniske vanskeligheder. Jordvarmelageret er endnu ikke afprøvet ved langvarig opvarmning til høje temperaturer, og der vil derfor være behov for nøjere undersøgelser på dette område i form af demonstrationsanlæg. Et lille forsøgsanlæg til undersøgelse af større jordvarmelagre er opført på DTH.

Damvarmelagre såvel isolerede som uisolerede er i dag afprøvede lagringsteknikker og damvarmelagrene udføres nu på kommerciel basis. De kommercielle damvarmelagre er baseret på betonløsninger. Der er behov for udvikling af teknikker til etablering af den billigste type af damvarmelagre baseret på plastliner mod jord og flydende isolerende låg. Varmelageret bør opføres som fuldskala forsøgsanlæg og demonstrationsanlæg.

Borehulslagre er en grundigt afprøvet teknik i specielt Sverige og Finland og er på nuværende tidspunkt ved at blive opført som demonstrationslager på DTH. Borehulslageret er i vore nabolande kommet over forsøgsstadiet med problemer og er i dag veludviklet teknik. De i Sverige forekomne borehulslagre er imidlertid ikke højtemperaturlagre i jordbundsforhold svarende til den typiske danske morænejordbund.

Varmelagring i klippehulrum er ligeledes afprøvet i Sverige på

forsøgsbasis. Teknikken har haft en del fødselsproblemer og er endnu ikke fuldt udviklet. Klippelageret er dog ikke aktuelt i Danmark.

Højtemperaturvarmelagring i undergrunden er stadig på udviklingsstadiet, mens varmelagring ved mindre end 40°C må vurderes at kunne være kommercielt og teknisk attraktivt. De hidtige erfaringer med forsøgsvarmelagre har vist:

- Det er muligt at simulere de termiske forhold ved varmelagring i et grundvandsreservoir med rimelig nøjagtighed, når de geohydrologiske parametre er kendte, og derved vurdere en given placerings egenskaber.
- Miljø- og materialevenlige vandbehandlingsmetoder må udvikles (særligt for varmelagring over 60°C).
- De accelererede geokemiske og mikrobiologiske processer som følge af lokal opvarmning/nedkøling og forøget strømningshastighed må kendes nøjere for at vurdere et reservoirs egnethed til energilagring.
- De miljømæssige langtidseffekter ved benyttelse af grundvandsreservoirer som varmelagre kan endnu ikke vurderes.

Generelt er der for sæsonlagre behov for følgende forskningsudviklings- og demonstrationsaktiviteter:

- Udvikling af beregningsprogrammer og forsøgsopstillinger til brug ved udvikling af teknikken - specielt den varmeoverførende del af lagrene. Dette er delvist udført.
- Opbygning af forsøgsvarmelagre, der er realistiske udsnit af sæsonlagre, med henblik på undersøgelse af især varmeoverføringsevne samt konstruktionstekniske forhold.
- Udvikling af teknikken til etablering af store jordvarmelagre, borehulsvarmelagre og aquifervarmelagre med henblik

på at kunne pege på generelt anvendelige, økonomisk optimale teknikker. Dette bør udføres i et samarbejde mellem institutioner og entreprenører.

- Udvikling af fjernvarmeanlæg og rumvarmeanlæg, der kan nøjes med meget lave temperaturer (30°C). Dette bør udføres i et samarbejde mellem institutioner og fabrikanter.
- Udvikling af beregningsprogrammer til dimensionering og analyse af store varmelagre. Programmet skal kunne regne på de forskellige typer varmelagre koblet til store solfangerfelter med eller uden bufferlagre og koblet til fjernvarmesystemet med forskellige back-up-anlæg f.eks. varmepumpe. Et program, der kan regne på én lagertype og én driftsstrategi, er under udvikling, men bør udbygges og underbygges. En analyse af de forskellige lagertyper og driftsstrategier bør udføres, så man kan pege på de bedste løsninger på området.
- Fuldskala varmelagre skal opføres og undersøges. Der må ydes ekstra store tilskud til disse anlæg, der skal tjene som reference for fremtidigt arbejde på området.
De første anlæg må betragtes og behandles som forsøgsanlæg. Derefter kan egentlige demonstrationsanlæg planlægges og opføres i forbindelse med egnede bebyggelser.

5.8. Datablad

Databladene for varmelagre indgår under kapitel 3 vedrørende solvarmecentraler, da varmelagring ikke indgår som en selvstændig teknologi i scenariemodellen.

6. ELLAGRING

Det danske elforbrug varierer kraftigt både over døgnet og over året. For at kunne klare de største spidsbelastninger skal den installerede effekt derfor være væsentlig større, end hvis forbruget var jævnt fordelt.

Der er med tiden sket en øget samproduktion af el og varme, hvilket har medført, at elproduktionen kan overstige elbelastningen (overløbsproblemet) i visse lavlastperioder for elbelastningen. Decentrale kraftvarmeværker opføres i dag oftest med et korttidsvarmelager, hvorved overløbsproblemer undgås.

En anden mulighed er at lagre el, men mulighederne for ellagring i stor skala vil næppe inden for en overskuelig fremtid blive økonomisk fordelagtige.

Den igangværende udbygning med vindkraft betyder også, at en stadig større del af elproduktionen varierer på en uforudsigelig måde. Endvidere medfører flere decentrale kraftvarmeværker samt miljøanlæg på eksisterende kraftværker, at reguleringskapaciteten på disse begrænses. Tilkobling af et ellager vil også i disse tilfælde have stor betydning.

De mest relevante muligheder for lagring i et elproduktionssystem er:

- pumpekraftværker
- trykluftkraftværker
- svinghjul
- superledning
- batterier.

6.1. Teknologisk udvikling og fremtidig vurdering

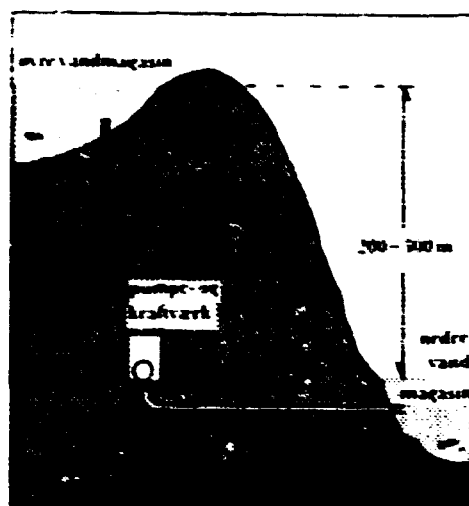
Pumpekraftværker

Ved at omforme elenergien til mekanisk energi (potentiell energi) opnås muligheder for lagring af store mængder energi, som hurtigt og med et begrænset tab kan gendannes som elenergi. Denne mulighed udnyttes såvel i pumpekraftværker som trykluftkraftværker.

Det første pumpekraftværk blev taget i brug i Schaffhausen i Schweiz så tidligt som i 1909. Udviklingen gik dog langsomt, idet konventionelle vandkraftværker med magasiner dækkede behovet for lagring og hurtig regulering. Den kraftige udbygning med termisk kapacitet efter 2. Verdenskrig bevirkede et fald i vandkraftværkernes relative andel af den samlede kapacitet. Pumpekraftværker blev derfor mere interessante, og i 1960'erne og især i 1970'erne kom der gang i udbygningen med pumpekraftværker. I løbet af de sidste 20 år er der på verdensplan opført pumpekraftværker med en samlet effekt på 2-3000 MW pr. år.

Pumpekraftværker bygges i meget varierende størrelser. 4 værker opført i perioden 1985-88 er således mindre end 100 MW. De største værker bliver dog stadig større. Det største pumpekraftværk i Europa er Dinorwic i Wales. Værket er på 1800 MW og blev taget i brug i 1982. Verdens største pumpekraftværk er Bath County i USA med en maksimal effekt på 2100 MW. Værket blev sat i kommerciel drift i 1985. I Sovjetunionen er det planlagt at opføre et pumpekraftværk på 3600 MW ved Kanev.

I et pumpekraftværk benyttes en overskudsproduktion af el til at drive en vandturbine eller pumpe, der pumper vand op i et højtliggende reservoir - naturligt eller kunstigt anlagt. I perioder med større energibehov udnyttes vandets potentielle energi, og vandet ledes den modsatte vej gennem værkets turbiner, som trækker generatorerne. Pumpekraftværker er i stand til at lagre el i flere måneder.



Figur 6.1. Skematisk snit gennem pumpemagasin

Et pumpekraftværk består af:

- Kraftværket (turbiner, pumper, generatorer, motorer etc.)
- Bassiner (naturlige eller kunstige vandmagasiner)
- Vandveje (indløbs- og udløbsbygværker, trykrør etc.)

Kraftværkets pumper og turbiner kan opføres som adskilte enheder eller som reversible pumpeturbiner. Tilsvarende kan motorer og generatorer opføres som adskilte enheder eller som motorgeneratorer.

Reversible pumpeturbiner med motorgeneratorer er de billigste. Starttiden fra stop til fuld last turbine og omskiftningstiden fra fuld last pumpe til fuld last turbine er ca. 1 minut. Det er vurderet, at under danske forhold er reversible pumpeturbiner de mest hensigtsmæssige.

Bassinet eller bassinerne er de mest pladskrævende anlægsdele i forbindelse med pumpekraftværker. En vurdering af mulighederne for at placere bassiner i Danmark har vist, at den mest realistiske placering af et pumpekraftværk er ved kysten, således at havet anvendes som nedre magasin, mens det øvre magasin placeres på et højland tæt ved kysten.

Endnu er der intetsteds i verden opført et pumpekraftværk, som anvender havet som nedre vandmagasin. Bl.a. japanske undersøgelser tyder imidlertid på, at en sådan løsning er umiddelbart gennemførlig. Japanerne har derfor besluttet at opføre verdens første havbaserede pumpekraftværk på den japanske ø Okinawa. Værket bliver et relativ lille demonstrationsanlæg på 30 MW.

Et bassin til et 250 MW pumpekraftværk, som skal kunne levere fuld effekt i 8 timer, vil ved en placering ca. 60 m over havet dække et areal på knap 1 km². Det anses for sandsynligt, at bassinets omfangsdæmning kan opføres af materialer bortgravet fra bassinets bund. Dæmningen vil blive ca. 20 m høj i forhold til oprindeligt terræn, og dens volumen vil blive ca. 3,2 mio. m³. Når bassinet er fyldt, vil det indeholde ca. 14,0 mio. m³ vand.

Under maksimal ydelse vil vandføringen i et 250 MW pumpekraftværk være meget stor, ca. 4-500 m³/s. Udløbet i havet skal derfor udformes på en måde, så der ingen risiko opstår for skibsfart og badende. Dette kan bl.a. opnås ved etablering af en afspærret sikkerhedszone.

Jo større højdeforskellen er mellem det øvre og det nedre vandmagasin, jo større energimængde kan der lagres. Pumpekraftværker opføres derfor i stort omfang i bjergrige egne, hvor der kan opnås store højdeforskelle mellem det øvre og det nedre vandmagasin. Der findes i dag ca. 250 pumpekraftværker i verden med en samlet effekt på over 80 GW. 20% af disse pumpekraftværker har en løftehøjde, der er mindre end 100 m.

Pumpekraftværker benyttes således allerede i dag under topografiske, geologiske og forsyningsmæssige forhold, der minder om de tilsvarende danske forhold. Som eksempel kan nævnes pumpekraftværket Geesthacht lidt øst for Hamburg.

Det har derfor været undersøgt, om pumpekraftværker til trods for manglen på store højdeforskelle alligevel er en attraktiv laeringsform også i Danmark.

Ud af 19 højtbeliggende kystnære lokaliteter i Danmark er 6 udpeget som måske egnede. Egnetheden af lokaliteterne må dog vurderes endeligt ud fra detaljerede geotekniske og hydrogeologiske undersøgelser.

Pumpekraftværker i Danmark må vurderes først at blive aktuelle efter år 2010, da teknologien endnu er på forundersøgelsesstadiet herhjemme. Ved endelig vurdering af lokaliteternes egnethed til placering af pumpekraftværker vil evt. to lokaliteter kunne opfylde alle de krav, der skal opfyldes for at kunne etablere et pumpekraftværk. Der kan derfor højst regnes med 2 pumpekraftværker med en middeleffekt på hver 250 MW svarende til en årlig samlet energiproduktion på 1000 GWh. Pumpekraftværkerne vil således kunne "producere" omtrent 3% af det samlede årlige elforbrug i Danmark.

Trykluftkraftværker

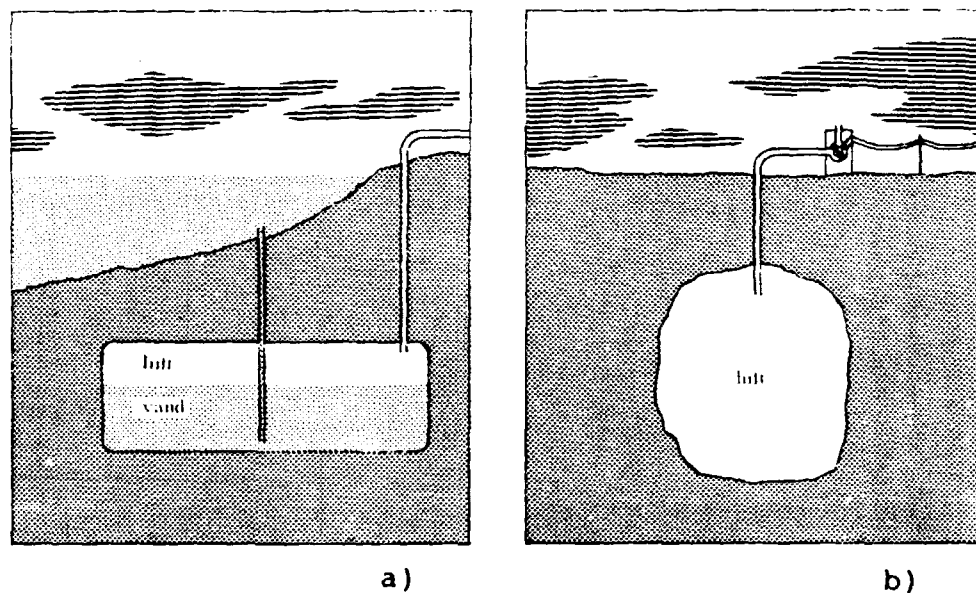
Ved at bruge energien til at komprimere luft i en lukket beholder, kan energien lagres over en døgnperiode. I perioder med lav belastning pumpes luft således til et magasin, hvorefter tryklufften i spidslastperioder ledes til et brændkammer, brændselsolie tilføres, og den dannede røggas driver en gasturbine, der producerer el.

For at finde tilstrækkeligt store muligheder for at lagre energi på denne måde må man ty til anvendelse af underjordiske hulheder eller kunstig frembringelse af sådanne. Dette begrænser naturligvis anvendelsen til steder med specielle geologiske forhold.

Nogle af de jyske salthorste menes at kunne anvendes til energilagring med komprimeret luft. Ligeledes vil lukkede grundvandsmagasiner være egnede til energilagring, idet grundvandet fortrænges ved nedpumpningen af trykluft.

Ved anvendelsen af salthorste som lagre er det en ulempe, at lufttrykket varierer med den lagrede energimængde. Det er dog i visse tilfælde muligt at reducere denne variation til et mini-

mum ved at fylde reservoiret med vand, og derefter ved hjælp af trykluft blæse dette gennem et rør op i en kunstig sø, se figur 6.2a.



Figur 6.2. Skematisk snit gennem to typer luftmagasin

Det skal bemærkes, at både pumpekraftværker og trykluftkraftværker kan benytte sig af dybtliggende klipperum. Sådanne undergrundskraftværker er endnu ikke opført noget sted i verden. Udgifterne til etablering af dybtliggende klipperum i Danmark vil være så store, at sådanne værker må anses for urealistiske i Danmark.

Der eksisterer i dag såvidt vides kun et enkelt trykluftkraftværk: Kaverneværket Huntorf nær Bremen. Anlægget er på 290 MW. Der har imidlertid i de senere år især i USA fundet en stor forsknings- og udviklingsindsats sted vedrørende trykluftkraftværker.

Kraftværket i Huntorf har været i drift siden 1977 og har fungeret tilfredsstillende. Alligevel er der ikke blevet iværksat flere anlæg af denne lovende type. Den væsentligste grund hertil ligger i økonomien. Høje energipriser i forbindelse med lille

virkningsgrad ved energiomdannelsen samt høje anlægsomkostninger især ved luftmagasinet har gjort luftmagasinkraftværker mindre attraktive i forhold til andre anlægstyper til dækning af spidslast.

Luftmagasiner til energilagring har tidligere været overvejet i Danmark, men blev opgivet grundet de høje priser på brændstof til gasturbiner.

Svinghjul


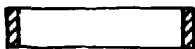


Lagring af energi i svinghjul er en af menneskets ældste opfindelser. Svinghjulsprincippet er meget enkelt. På tidspunkter, hvor der produceres overskydende energi, sættes hjulet i rotation. Når der igen er brug for energi, tappes hjulet for den opsparede mekaniske energi. Med udviklingen i materialeteknologi og i mekanisk formgivning er det muligt at fremstille kæmpesvinghjul, der kan bruges til opbevaring af energi i elkraftssystemer.

Anvendelse af svinghjul til lagring af større mængder energi over døgnet er af ny dato og helt og holdent betinget af nye materialer til lejer og roterende masse. Den største energitæthed kan opnås ved anvendelse af lette materialer. Specielt er de nye, lette fibermaterialer med stor styrke velegnede.

De høje hastigheder i svinghjulet medfører store mekaniske spændinger i hjulet og i rotormaterialet. Den største energimængde, man derfor kan lagre i et givet svinghjuls volumen, bestemmes af materialets styrke, d.v.s. den største spænding materialet kan udsættes for, σ_{\max} . For at opnå en stor lagringseffekt må man derfor anvende et let og stærkt materiale.

For at udnytte svinghjulets evne til at lagre energi bedst muligt skal svinghjulet udformes som vist øverst i figur 6.3. På denne måde er det udsat for lige stor spænding overalt. Formfaktoren A er her lig 1,00. Den størst mulige energi i hjulet er $E_{\max} = A \cdot \sigma_{\max} / \rho$.

Figur 6.3 angiver formfaktorerne for forskellige konstruktioner af svinghjul. Den plane cirkulære skive med et hul i midten er en ugunstig konstruktion, da kræfterne her fuldstændigt må optages i tangentiell retning ved hullet, og materialet således der bliver udsat for meget store spændinger. Samtidig belastes svinghjulet totalt ikke til mere end halvdelen eller en fjerdedel af, hvad det kan tåle. Hjulet kan derfor eksplodere indefra.

Type		Formfaktor (A)
Konisk skive		1,00
Tøndeband		0,50
Plan cirkulær skive med hul		0,31
Konventionel ringrotor		0,25 - 0,40

Figur 6.3. Formfaktorer for diverse svinghjulsgeometrier

Et mekanisk brud på en systemdel kan indebære, at store massekræfter udløses. Rotoren bør derfor udstyres med en stærk indkapsling. Dette medfører øget vægt og volumen samt større omkostninger for svinghjulet. De metalliske rotorere har vist sig at være meget farlige, hvis de splintres, og de nyere kompositmaterialer som f.eks. glas-, kulstof- eller aramidfiberforstærket plast har derfor nu fået betydning. Kompositmaterialernes store specifikke styrke gør, at der kan lagres meget større energimængder pr. masseenhed, uden at svinghjulet går i stykker. Det er således muligt at opnå en energitæthed, der er op til 50% større end med højkvalitetsstål. Yderligere vil kompositmaterialet i tilfælde af sammenbrud blive til en fibrøs masse og ikke splintres som en stålrotor.

Svinghjulssystemer kan muligvis anvendes i elkraftværker til at dække spidsbelastningerne. Der er endnu ikke bygget store sta-

tionære anlæg med svinghjul til almindelige kraftværker, og det er vanskeligt at vurdere fremtidsmulighederne herfor.

Teknologien vil ligeledes kunne benyttes i køretøjer, idet der kan indbygges små svinghjulssystemer, som kan opsamle bilers bevægelsesenergi, når der bremses. Dette er allerede afprøvet i busser (hybridbusser).

Den væsentligste forskning inden for området foregår p.t. i USA.

Superledning

Opdagelsen af nogle nye elektriske materialer, der har helt enestående egenskaber, har skabt en ekstatiske aktivitet i verdens forskningslaboratorier. Det drejer sig om de såkaldte superledere, d.v.s. stoffer, der kan lede en elektrisk strøm helt uden at yde modstand. De enorme teknologiske perspektiver, der ligger i denne egenskab, er grunden til, at man satser så voldsomt på dette område.

Blandt en række anvendelsesmuligheder kan nævnes:

- tabsfri overførsel af elektricitet
- superhurtige regnemaskiner
- superhurtige tog, som svæver på magnetfelter
- billigere og bedre medicinsk udstyr
- bedre elektromotorer og generatorer
- elektrisk energilagring
- magnetpoler til fusionsreaktorer.

Superledning har været kendt siden 1911, da den hollandske fysiker Kammerlingh-Onnes opdagede, at den elektriske modstand af kviksølv forsvandt ved temperaturer under 4 K. I de efterfølgende år blev der arbejdet ihærdigt på at finde materialer, der blev superledende ved højere temperaturer. I tidsrummet frem til begyndelsen af 1986 havde man fundet en lang række superledende metaller og legeringer, men ingen af dem havde overgangstemperaturer (d.v.s. blev superledende) over 23 K ($+250^{\circ}\text{C}$).

Disse lave temperaturer kan frembringes med flydende helium, men anskaffelse og fortætning af helium til flydende form er så bekostelig, at superledere hidtil kun har været anvendt til meget specielle formål. Siden fyrrerne blev overgangstemperaturen kun hævet med 8 K, og siden 1973 skete der ingen fremskridt. Temperaturer omkring 23 K lod altså til at være den øvre grænse for superledning, indtil to forskere i Zürich i januar 1986 observerede superledning ved temperaturer omkring 30 K i et materiale af lanthan-barium-kobber-oxid. I modsætning til traditionelle superledere, der er "almindelige" metalliske materialer, er lanthan-barium-kobber-oxid snarere en keramik. Før den bliver superledende, har den således en ret begrænset ledningsevne. Selv om der ikke er nogen direkte sammenhæng mellem en superleders overgangstemperatur og dens ledningsevne i normalt tilstanden (over overgangstemperaturen), var det forbløffende at finde en så høj overgangstemperatur.

Forholdsvis få forskere var opmærksomme på opdagelsen, og en del var yderst skeptiske indtil efteråret 1986, hvor en række forskergrupper havde eksperimenteret med forsøget og bekræftet tilstedeværelsen af superledning. Fra da af tog udviklingen fart i USA, Japan, Europa og Kina, og der blev fremstillet nye superledere af den samme type, men med endnu højere overgangstemperaturer.

I marts 1987 offentliggjorde en forskergruppe, at yttrium-barium-kobber-oxid bliver superledende ved 93 K. Herved brød man en magisk grænse for teknologiske anvendelser af superledende materialer. Ved disse temperaturer er det nemlig muligt at anvende flydende kvælstof som kølemiddel. Flydende kvælstof er ca. 50 gange billigere end flydende helium, langt lettere at fremskaffe og håndtere, og kølevirkningen er betydeligt større.

Selvom superledning kan opnås ved køling med flydende kvælstof, fortsætter udviklingen alligevel mod drømmemålet: En superleder, der fungerer ved stuetemperatur. Der er gjort yderligere fremskridt, idet to nye systemer baseret på bismuth-kalcium-strontium-kobber-oxid og tallium-kalcium-barium-kobber-oxid er blevet

opdaget. Herved er den højeste temperatur for superledning rykket yderligere 32°C opad i forhold til de 93 K, som blev fundet i yttrium-barium-kobber-oxid i 1987.

Den hektiske forskningsaktivitet, som opdagelsen af de nye materialer har affødt, skyldes dels de meget store forventninger, der knyttes til de teknologiske anvendelser, og dels den udfordring, der ligger i at forstå, hvordan de nye keramiske materialer er i stand til at bevare de superledende egenskaber ved de meget høje temperaturer.

Endnu er forståelsen af de nye keramiske superlederes egenskaber meget ufuldstændig, men med opdagelsen af de nye systemer har man inden for den grundlæggende forskning fået bedre muligheder for at studere de mekanismer, der fører til superledning ved høje temperaturer.

I 1969 var det første gang, at det blev foreslået at anvende superledning i forbindelse med ellagring til brug for spidslast-situationer. Det var da tanken at opbygge en stor centralt placeret SMES (superconducting magnetic energy storage)-enhed, der var i stand til at udveksle elektrisk energi med det franske net.

Tidligt i udviklingen viste det sig, at store magneter var mere økonomiske end små magneter. Derfor er udviklingen indtil for nylig blevet koncentreret om anlæg, der kunne lagre mellem 1000 og 10.000 MWh energi. Ved sammenligninger med forskellige spolekoncepter og økonomiske undersøgelser viste en solenoide konfiguration sig at være mest økonomisk.

Adskillige økonomiske estimeringer foretaget tidligt i udviklingen indikerede, at SMES-anlæg blev nødt til at have meget stor effekt for at være økonomiske.

I 1980 udvalgte en anlægskonfiguration, man detailprojekterede den og opstillede økonomien. Der blev valgt en konfiguration med en lav spolehøjde i forhold til spolediameteren. Anlægsstørrelsen, der blev overvejet i dette projekt, var 5000 MWh/1000 MW.

To overvejelser indikerede, at omkostningerne ved en sådan spole var små nok til, at det var værd at arbejde videre med superledende materialer til energilagring. Projektet blev efterfulgt af endnu et projekt, der havde til formål at forbedre design og reducere omkostningerne.

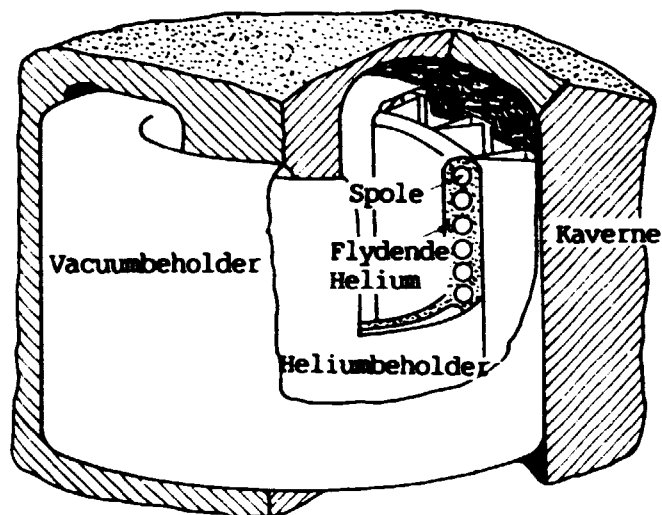
I USA er der designet en lille SMES-spole (30 MJ). Denne spole er anvendt for at reducere de elektriske spændingsvariationer på Bonneville Power Authority-systemet. Den her nævnte SMES-spole var i drift i 1983-1984 og fungerede godt.

Samtidig med den her nævnte udvikling i USA har der foregået en del udvikling i Japan.

Hovedelementet i systemet er den superledende spole. Spolens dimensioner bestemmes udfra den ønskede energilagringsskapacitet samt af det valgte spoledesign.

Figur 6.4 viser et snit gennem et solenoide SMES-anlæg opbygget i undergrunden. Spolen er kun superledende ved meget lave temperaturer. For derfor at bevare den superledende effekt under drift er spolen anbragt i "superflydende" helium. Under 2.2 K udviser flydende helium en bemærkelsesværdig høj termisk ledningsevne og næsten et totalt viskositetstab. Denne egenskab defineres som "superflydende".

Den superledende spole er placeret i en kappe, som består af en vacuumbeholder og en heliumbeholder, der omslutter den superledende spole og opbevarer det flydende helium, der afkøler spolen. Spolen og heliumbeholderen er understøttet fra den underjordiske kavernes bund og vægge ved hjælp af stivere med lav varmeledning placeret på den udvendige side af spolen. Spolen er placeret i undergrunden, hvilket er en økonomisk metode til at skaffe radial støtte.



Figur 6.4. Solenoide SMES-anlæg i undergrunden

Varmer, der bliver genereret i spolen eller overført til det omgivende helium, fjernes ved hjælp af en lavtemperaturkølemaskine. Helium benyttes indtil nu som arbejdsmedium i kølemaskinen, da det er det eneste stof, der kan fungere enten som væske eller som gas ved en driftstemperatur, der er tæt ved det absolutte nulpunkt.

Strømmen i den superledende spole ledes gennem specielle lavtabsledninger. Varmen, der ledes til spolen, absorberes i et heliumbad.

Jævnstrømmen i den superledende spole vil være af størrelsesordenen 100 kA. Der kræves endvidere et styresystem for at skabe forbindelsen med vekselstrømnettet.

Med opdagelsen af de nye højtemperatursuperledere ændres de økonomiske og teknologiske perspektiver for energilagring i superledende magneter drastisk i positiv retning. Der forestår imidlertid et teknologisk udviklingsarbejde, før de nye materialer kan anvendes til superledende tråde i magnetfeltspoler.

Batterier

Teknisk set er et batteri en samling af elektrokemiske celler, også kaldet galvaniske elementer. En celle indeholder to elektroder og sædvanligvis en elektrolyt. Elektrodernes aktive komponenter kan enten være faste, flydende eller luftformige. De to elektroder skal være adskilt af en elektrolyt, som enten er fast eller flydende. En elektrolyt er kendetegnet ved at være en god elektronisolator og en god leder af ioner. Derved kan oxidation og reduktion af elektroderne kun foregå, når elektronerne overføres gennem en ydre ledning, hvorved omsætningen mellem elektrisk og kemisk energi muliggøres.

Den følgende beskrivelse af batterier som energilager for elektricitet er begrænset til en omtale af sekundære batterier. Det vil sige batterier, der kan oplades og aflades et mindre eller større antal gange. Omtalen af primærbatterier (tørbatterier) er udeladt, fordi anvendelsen af sådanne batterier ikke skønnes at have energimæssige konsekvenser. Brændselsceller vil ikke blive behandlet i denne rapport.

Et batteris anvendelighed beskrives først og fremmest ved dets pris, levetid, virkningsgrad, effekttæthed og energitæthed. Andre forhold, f.eks. driftstemperatur, kan dog være afgørende ved specifikke anvendelser. Blyakkumulatoren er det batteri, som har den mest udbredte anvendelse i dag. Dens styrke er først og fremmest prisen pr. lagret energienhed. Andre batterier, som f.eks. nikkelcadmium og hydrogen-oxygen batteriet er i andre henseender bedre end blyakkumulatoren. Der findes flere typer, hvoraf nogle allerede anvendes kommercielt i visse sammenhænge.

I begyndelsen af dette århundrede var anvendelsen af batterier ret udbredt både til elbiler og i elsystemet. Antallet af elbiler var næsten det dobbelte af biler med forbrændingsmotorer. Elbilerne blev udkonkurreret af masseproduktionen af Fords model T, som var overlegen m.h.t. rækkevidde.

Dengang elsystemet var karakteriseret ved en decentraliseret jævnstrømsproduktion, havde de fleste elværker installeret et ret stort blybatteri. Denne anvendelse ophørte ved fremkomsten af et sammenhængende net af vekselstrømsproducerende kraftværker.

Siden 1973 har der været en intensiv forskning i nye batterityper.

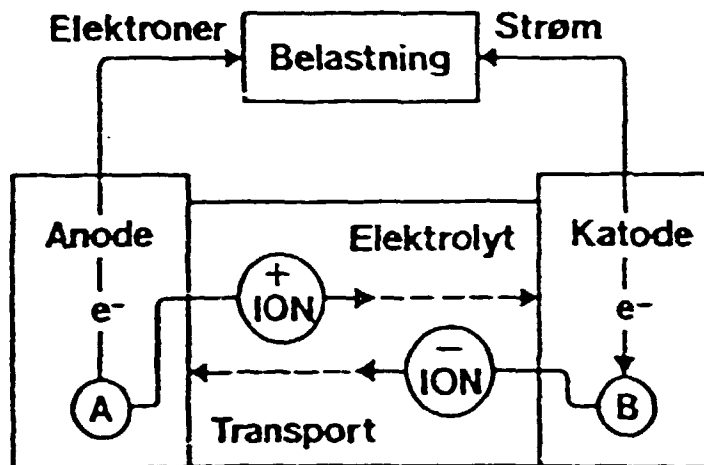
Således er nye typer af batterier med høj energitæthed under udvikling i laboratorierne verden over. I de senere år har der især været en koncentreret indsats på udvikling af lithium batterier, men også på forskning og udvikling af natrium batterier og brændselceller ofres der betydelige midler. Desuden anvendes en betydelig brøkdel af batteriforskningens ressourcer på videreudvikling af gammelkendte systemer og ikke mindst på blyakkumulatoren.

Der er opnået så betydelige forbedringer af bly-syre batteriet, at andre batterityper næppe vil være i stand til at true dette på dets anvendelsesområder inden for de næste 5-10 år. Det nuværende marked for batterier er domineret af bly-syre batterier med en markedsandel på over 90%. Resten af markedet dækkes af nikkel-cadmium og nikkel-jern batterier.

Dette betyder dog ikke, at man har opgivet at udvikle bedre batterier. Der er i de danske, såvel som i de internationale batterikredse, en sikker overbevisning om, at gennembruddet for batterierne nok skal komme, selvom det lader vente på sig.

De potentielle muligheder i batterierne er så store, at de nødvendige midler til at nå målet i alt fald vil være til stede internationalt set.

Som vist på figur 6.5 består et batteri af en positiv elektrode og en negativ elektrode adskilt af en ionledende men ikke elektronledende elektrolyt.



Figur 6.5. Batteri under afladning

I det følgende gennemgås udviklingsmulighederne for forskellige batterityper.

Bly-syre

Negativ elektrode: Bly (Pb)

Positiv elektrode: Blyoxid (PbO_2)

Elektrolyt : Svovlsyre (H_2SO_4)

Selv om bly-syre batteriets princip er forblevet uændret siden dets opfindelse i 1859 er der dog sket væsentlige forbedringer med hensyn til f.eks. energitæthed, levetid og pålidelighed.

To forskellige versioner er kommercielt tilgængelige: fladplade og rørcelle, som opfylder hver sine krav til energi, effekt og levetid.

Generelt vil et fladpladebatteri, som f.eks. et startbatteri, kun kunne klare 100-300 udladningscykler. Kravet om høj effekt-tætheden giver en udformning af elektrodepladerne, der specielt for den positive elektrode er meget sårbar overfor dybe udladninger.

I et rørcellebatteri er den positive plades aktive masse forstærket (omsluttet) af et rør. Man betaler her for den høje levetid (1000-1500 cykler) med en lav effekttæthed og højere omkostninger. Det er denne type, der anvendes i elbiler.

Bly-syre batteriets anvendelighed til lastfordeling i elsystemet kan teknisk set begrundes, men det skønnes ikke økonomisk forsvareligt.

Der foregår stadig en betydeligt forskningsindsats for at forbedre levetid og energitæthed, men mulighederne for forbedring af energitætheden er begrænset.

Nikkelbatterier

	<u>Ni/Cd</u> -----	<u>Ni/Fe</u> -----	<u>Ni/H</u> -----
Negativ elektrode:	Cadmium (Cd)	Jern (Fe)	Brint (H)
Positiv elektrode:	Nikkeloxid (NiOOH)	NiOOH	NiOOH
Elektrolyt	: Kaliumhydroxid (KOH)	KOH	KOH

Der foregår en del udvikling inden for nikkel-brint-batterier. De store fordele ved nikkel-brint-batterierne er, at de har lang levetid og dermed mange cykler, ingen vedligeholdelse samt, ikke mindst, at de har en høj tolerance for mishandling. Batteriet er attraktivt kombineret med solceller, idet den maksimale ydelse af solcellerne herved kan udnyttes.

Nikkel-cadmium- og nikkel-jern-batterierne er kommercielt tilgængelige typer og har højere effektivitet, effekttæthed og energitæthed end bly-syre. Endvidere er virkningsgraden ret uafhængig af, hvor hurtig afladningen sker.

Alle nikkelbatterier er dyrere end bly-syre batteriet på grund af prisen på nikkelelektroden. Prisen opvejes imidlertid af nikkelbatteriernes bedre egenskaber, men er dog for høj til anvendelse i elsystemet.

Generelt må nikkelbatterierne ventes at kunne konkurrere med

bly-syrebatteriet inden for en kort årrække, såvel til transportformål som til energilagring.

Lithiumbatterier

	<u>Li/V</u>	<u>Li/Mn</u>
Negativ elektrode:	Lithiumfolie	Lithium (Li)
Positiv elektrode:	Vanadiumoxid	Manganoxid (MnO ₂)
Elektrolyt	: Polymer	Organisk

I mere end 10 år er der i Danmark arbejdet på udviklingen af faststof-lithium-polymer batterier, og udviklingen er nu så langt, at en pilotproduktion kan starte primo 1990.

Hidtidige målinger og analyser viser, at de nye genopladelige lithiumbatterier er langt bedre end de allerede eksisterende batterier. Dette gælder specielt områderne energitæthed, strømtæthed og holdbarhed. Således er lagerholdbarheden på et blybatteri ca. 1 år, mens det nyudviklede batteri har en holdbarhed på omkring 5 år.

Prisniveauet for faststof-lithium-polymer batteriet er anslået til at ligge et sted mellem de almindelige blybatterier og de genopladelige nikkel/cadmium batterier.

Udviklingen af faststof-lithium-polymer batterier har indtil nu udelukkende foregået i Europa, men efter det teknologiske gennembrud i Danmark på området følger både japanske og amerikanske virksomheder nøje med i udviklingen.

Mangandioxid-lithium batteriet er et genopladeligt batteri, der nu er kommercielt tilgængelig. Batteriet har en høj elektrisk spænding (3 volt) og er derfor i stand til at erstatte to NiCd batterier og alligevel yde to til tre gange så stor en energitæthed. Udover at fungere som transportabel energikilde forventes de genopladelige mangandioxid-lithium batterier at være egnede kombineret med solceller til hybridformål.

Natrium-svovl

Negativ elektrode: Svovl (S)

Positiv elektrode: Natrium (Na)

Elektrolyt : Beta-alumina

På baggrund af opdagelsen af høj ionledningsevne for det keramiske materiale beta-alumina gjort af forskere ved Ford Motor Co., USA, i midten af 1960'erne opstod konceptet til et natrium-svovl (Na-S) batteri, som siden har været genstand for en intens F&U-indsats i USA, Europa og Japan. På verdensbasis overstiger den totale økonomiske indsats en halv milliard \$, en indsats der er størrelsesordener højere end den indsats, der er gjort vedrørende andre avancerede batterisystemer. Det må ses på baggrund af, at batteriet består af materialer, som ikke er underlagt nogen ressourcebegrænsning. Da råstofferne natrium, svovl og aluminiumoxid er billige, kan en potentiel lav pris på batteriet forudses.

Det er allerede lykkedes at fremstille effektive, højenergitætheds batterier med meget stor kapacitet til elsystemet samt letvægts højeffektætheds batterier til transportformål.

Det første kommercielle batterilagringsanlæg blev opført i oktober 1987 i Vest Berlin. Vestberlins elnet er blevet afskåret fra nabonettene ved den politiske isolation af byen efter anden verdenskrig. Batterilageret regulerer derfor det elektriske system og sørger for reservekapacitet. Anlægget er et bly-syre anlæg. Energikapaciteten er 14,4 MWh for fem timers afladning og 4,5 MWh for øjeblikkelig reservekapacitet. Til frekvenskontrolformål må effekten være 8,5 MW og 17 MW til reserveformål. Anlægget består af 12 rækker af battericeller. Den maksimale strøm pr. række er 600 ampere ved almen drift og 1200 ampere som reserve.

Japanerne begyndte i 1987 på et eksperimentelt batterisystem i Osaka i Japan. Dette anlæg har en effekt på 1 MW.

I USA er Southern California Edison Co. og Electric Power Research Institute i færd med opbygning af et 10 MW-anlæg med bly-syre batterier. Anlægget, der opbygges i Chino i Californien, bliver det første kommercielle anlæg i USA.

Et demonstrationsanlæg er ligeledes under konstruktion i USA. Dette anlæg vil bestå af zink-klor batterier. Batteriet er et 2 MW, 6 MWh batteri opbygget til en afladning på 3-4 timer. 2 MW-systemet er opbygget af 16 moduler á 125 kW med en central hydratlagertank på 15.000 gallon. Designparametrene er 67 timers opladning og 3,9 timers afladning. Der regnes med en udbytning af cellerne hver 10. år. Investeringerne er beregnet til 500-800 \$ pr. kW. Heraf udgør udbytningen af celler hver 10. år mellem en tredjedel og halvdelen af udgifterne.

6.2. Energiforhold

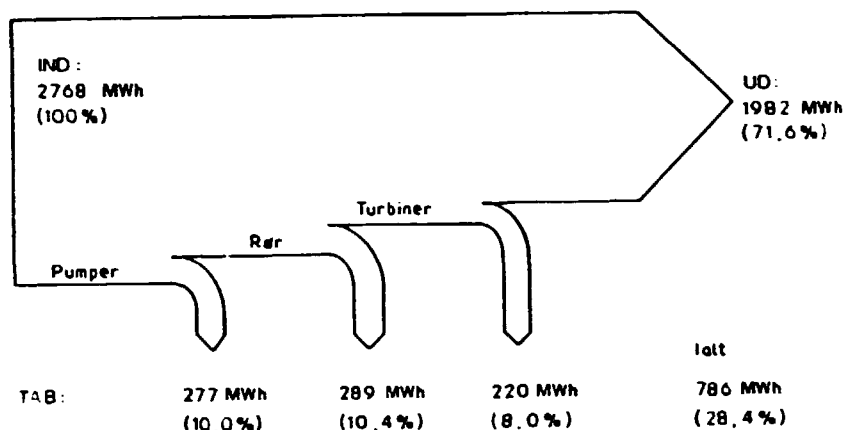
Pumpekraftværker

For et pumpekraftværk er effektiviteten defineret som forholdet mellem den udnyttelige energimængde under turbinedrift og den energimængde, der er nødvendig til oppumpning af vandet. Begge disse energimængder afhænger af såvel vandmængde som trykhøjde.

Effektiviteten af et pumpekraftværk ligger typisk i området 65-75%.

Figur 6.6 viser grafisk energikredsløbet for et 250 MW-pumpekraftværk. Det ses, at energitabet er nogenlunde ligeligt fordelt på pumper, rør og turbiner.

Vandføringen vil for et pumpekraftværk være lavere under pumpe-drift end under turbinedrift, hvilket medfører, at pumpetiden bliver længere end turbinetiden. En døgncyklus for et 250 MW-pumpekraftværk vil altså kunne omfatte 8 timers produktion, 11 timers pumpning og 5 timers stilstand.



Figur 6.6. Energikredsløb for 250 MW-pumpekraftværk

Trykluftkraftværk

Ved lagring i trykluftmagasiner komprimeres luften, som således bliver varm og må afkøles. I selve værket køles hele den frigjorte mængde varme fra kompressionsarbejdet derfor bort. Det vil derfor være misvisende at angive energimængder for trykluftkraftværker.

I stedet for at angive energimængder, angives hvor meget arbejde det er muligt at udvinde fra trykluftten (exergimængden).

I det indtil nu eneste trykluftkraftværk i verden, Hüntdorfværket, kan der ved trykluftlagring udvindes omkring 60-65% af den indkomne exergi, hvilket angiver lagringseffektiviteten.

Et trykluftlager som det i Hüntdorf etablerede er hovedsageligt afset til at kunne levere meget store effekter til elnettet på kort tid for således at klare spidsbelastningerne. I Hüntdorf er det således muligt at generere 290 MW under afladningen i 2 timer, mens selve opladningen af lageret varer omkring 8 timer, idet der udtages 60 MW fra nettet.

Svinghjul

For at svinghjulet kan virke som et brugbart energilager, er det nødvendigt, at hjulet kan snurre hurtigt. Friktionen fra den omgivende luft vil bremse svinghjulet kraftigt, og motorerne skal derfor placeres i vakuum mindre end 10^{-4} bar, hvilket stiller store krav til tætheden i systemet, idet det skal undgås, at luft trænger ind i systemet fra omgivelserne.

For at opnå høj tæthed skal svinghjulslejerne gøres tætte. Dette medfører imidlertid høj friktion, og man må derfor vurdere, om det er vigtigst med høj friktion eller tæthed. Dette og kraftoverføringen medfører energitab. Ved normale driftsforhold kan der regnes med en virkningsgrad på 75%.

Den specifikke energi (pr. masseenhed), der maksimalt kan lagres i et svinghjul, kan udtrykkes ved $E_{\max} = A \cdot \sigma_{\max} / \rho$

$$E_{\max} = A \cdot \sigma_{\max} / \rho$$

A = formfaktor

σ_{\max} = den maksimale spænding svinghjulet kan udsættes for

ρ = densitet af svinghjulets materiale.

Nedenstående tabel viser den mængde specifik energi, der maksimalt kan lagres i et svinghjul formet som tøndebånd ($A = 1/2$).

Materiale	Maks. specifik energi lagret i tøndebånd (MJ/kg)	Densitet (kg/m ³)
Træ	0,02	550
Alm. stål	0,03	7800
Titanlegering	0,1	4500
Epoxy/kulfiber	0,2	1550
Epoxy/fiberglas	0,05	1900
Epoxy/kevlar	0,3	1400

Den specifikke energi, der maksimalt kan lagres i svinghjulet, er således afhængig af svinghjulsmaterialet. Svinghjul udført i epoxy/fiberglas har den højeste lagringstæthed, og det er svinghjul udført i sådanne materialer, der vil blive aktuelle i fremtiden.

Superledning

Når det superledende system anvendes som lager, er teknologien utrolig effektiv sammenlignet med andre lagringsteknologier. Effektiviteten ved omformning fra vekselstrøm til jævnstrøm og ved energilagringen i et SMES-system er omkring 97%. Afladningseffektiviteten er af samme størrelsesorden, således at den totale effektivitet ved at benytte SMES-systemet som døgnlager er omkring 94%.

Effektiviteten er bedre end for andre lagringsteknikker. På SMES-anlæggene er der til gengæld et energitab ved benyttelse af kølesystemet, der er nødvendigt for at holde superlederen kølig. Effektiviteten afhænger af, hvor meget anlægget benyttes, men forventes at ligge mellem 85% og 90% i gennemsnit over en lang periode.

Batterier

Afladning (og opladning) af et batteri er en delvis irreversibel proces, hvor noget af energien tabes i form af varme.

Aflades et batteri meget hurtigt, vil kun en lille del af den kemiske energi fås som nyttigt arbejde. Aflades batteriet langsomt, vil temperaturstigningerne ikke være så voldsomme, og det nyttige arbejde nærmer sig det teoretisk mulige. De her nævnte størrelser, effekttæthed og energitæthed, modarbejder hinanden.

Når energitætheder angives og sammenlignes, er det derfor af yderste vigtighed, at det opgives hvor hurtigt afladningen er sket.

Batteriets ydeevne og levetid er stærkt afhængig af driftsforholdene såvel under opladning som under afladning. En sædvanlig angivelse af den cykliske levetid refererer til 80% afladning, hvor 80% af batteriets energiindhold ved en given effekt (afladningstid) udtages.

Energiforholdene for nogle af de tidligere omtalte batterier er angivet i nedenstående tabel: Nøgledata for kommercielle batterisystemer.

Nøgledata for kommercielle batterisystemer

	Bly- syre	Nikkel- cadmium	Nikkel- jern	Natrium- svovl	Faststof- lithium
Elektrolyt	H ₂ SO ₄	KOH	KOH	Beta-Al ₂ O ₃	Organisk
Driftstemperatur (°C)	-20 +50	-30 +50	+10 +50	+300 +400	-40 +150
Spænding (V)					
emf	2,05	1,35	1,37	2,1-1,8	3,3
afladning 2 h rate	1,9	1,2	1,2	1,7-1,4	3
Energivirkningsgrad (lade-aflade) %	75	70	>60	70-75	?
Specifik energi (Wh/kg)	35	28	40	120	150
Specifik effekt (W/kg)					
1 h rate	70	60	100	170	70
spidsværdi	120	300	440	240	700
Levetid (80% afladning) cykler	500	2000	2000	2000	>200

6.3. Miljøforhold

Pumpekraftværk

Alle eksisterende pumpekraftværker anvender enten floder, søer eller kunstige søer som øvre og nedre magasiner.

Der findes ikke floder (åer) i Danmark, der er store nok til at fungere som bassin for et pumpekraftværk. Anvendelse af naturlige søer er udfra miljø- og fredningshensyn heller ikke mulig. Den eneste realistiske mulighed er derfor at etablere to kunstige bassiner eller evt. at benytte havet som det nedre magasin. Det kan dog flere steder i Danmark være overordentlig vanskeligt at opnå fredningsmyndighedernes tilladelse til at opføre de nødvendige bassiner, der vil dominere landskabet kraftigt.

Med Danmarks lange kystlinie vil det være oplagt at benytte havet som nedre magasin. Det væsentligste problem herved er havvandets saltindhold. Der er i japanske undersøgelser undersøgt, om sprøjt fra det saltvandsfyldte øvre bassin kan skade omgivelserne f.eks. afgrøder på tilliggende marker, men dette forekommer ikke at være noget problem.

Et højtbeliggende bassin fyldt med flere millioner kubikmeter havvand vil udgøre en risiko for omgivelserne, og der må derfor stilles strenge krav til projekteringen. Selvom bassinet udføres med en tæt asfaltmembran, vil der altid med tiden være risiko for en vis udsivning af saltvand. For at undgå saltvandsforurening af vigtige grundvandsmagasiner bør bassinet placeres i et område, hvor grundvandsstrømmen er rettet mod kysten.

Trykluftkraftværk

Ved etablering af et trykluftkraftværk benyttes undergrunden som trykluftsmagasin (f.eks. en kaverne i en salthorst eller et lukket grundvandsmagasin, hvor vandet fortrænges).

En sådan benyttelse af undergrunden kunne kræve godkendelse fra miljømyndighederne, da en evt. udsivning fra magasinet vil kunne påvirke grundvandet.

Under afladning fra reservoiret føres trykluftten til et forbrændingskammer, hvor brændsel tilføres og forbrændes for således at frembringe gasser ved høje temperaturer. Emissionen, der herved fremkommer, er afhængig af brændslet og forbrændingsomstændighederne.

Svinghjul

Benyttelse af svinghjul til energilagring medfører ingen miljømæssige problemer.

Superledning

Den superledende magnet vil sandsynligvis være underjordisk, men vil ikke kunne medføre miljømæssige effekter i undergrunden.

Batterier

De miljømæssige fordele ved batterier er åbenbare, idet selve driften ikke involverer nogen forurening. Anvendelse af store mængder tungmetaller kan dog give problemer, hvad angår miljø. F.eks. anvendes omkring 40% af blyet i den vestlige verden til batterier.

6.4. Økonomi

Pumpekraftværk

På grundlag af fremskaffede anlægsudgifter oplyst i litteratur og databaser er det muligt at udregne anlægsudgiften for et pumpekraftværk afhængig af effekten:

$$U_{\text{tot}} = 30.000 p^{-0,3} \pm 20\%$$

U_{tot} = Enhedspris i kr./kW for hele værket inkl. bassin,
vandveje m.m.

p = Effekt i MW.

Enhedsudgiften falder med stigende effekt på værket.

Driftsudgiften omfatter almindelig drift, vedligeholdelse samt udgifter til oppumpning. Driftsudgifterne vurderes at udgøre 1% af anlægsudgiften.

Trykluftkraftværk

Økonomien for trykluftkraftværker er udelukkende baseret på planlægningspriser, som sandsynligvis er optimistiske priser. Herudfra vurderes anlægsprisen til nedenstående:

Trykluftkraftværk: 4500 kr./kW \pm 1500 kr./kW

I Huntorf-anlægget i Tyskland kan der ved opladning med 1 kWh el og 1,49 kWh brændsel produceres 1,28 kWh el. Produktionsudgifterne beløber sig således med disse forhold taget i betragtning til 1,14 kr./kWh p.g.a. brændselsprisen.

Svinghjul

Udgifterne til opbygning af svinghjulsagre samt for den leverede energimængde fra svinghjulet afhænger bl.a. af udformning og specielt af materialevalg.

Epoxy-blandinger er de økonomisk bedst egnede materialer til energilagring i svinghjul.

Superledning

De totale omkostninger ved etablering af et 5000 MWh SMES-anlæg med en effekt på 1000 MW er 980 millioner dollars \sim 7.350 mil-

lioner kr. (1985-niveau). Ud af dette beløb er der afsat 25% til uforudsete udgifter.

Omkostningerne ved etablering af mindre SMES-anlæg har ligeledes været estimeret. Prisen pr. lagret enhed er stort set den samme for energimængder ned til 1000 MWh. De totale effektomkostninger er omkring 1035 kr./kW.

Batterier

Omkostningerne til batterier og dermed prisen på den leverede energimængde fra batterierne afhænger af det benyttede materiale til batteriet. Det billigste batteri er i dag bly-syre batteriet, men der arbejdes intensivt på at få de øvrige batterier ned på samme prisniveau.

I nedenstående tabel er omkostningerne for de forskellige ellagre angivet, således at energiprisen ved benyttelse af de respektive ellagre kan sammenlignes. Anlægs- og effektomkostninger er opgivet i videst muligt omfang.

	Anlægs- omkostninger (mio.kr.)	Effekt- omkostninger (kr./inst.kW)	Energi- omkostninger (kr./lagret kWh)
Pumpekraftværk - 250 MW	1100-1700	5700	2,2-3,4
2000 MW	4900-7300	3100	
Trykluftkraftværk 250 MW	750-1500	4500	1,14
Svinghjul - alm. stål			3600
- epoxy/fiberglas			1450
Superledende spole - 1000 MW	7350	1035	1470
Batteri - bly-syre			2000
- nikkel/cadmium			11900
- lithium			3200

Som det fremgår af tabellen er der stor forskel på prisen pr. lagret energienhed ved benyttelse af de forskellige ellagrings-systemer. Det må her bemærkes, at nogle af ellagrene sandsynligvis vil blive benyttet i vidt forskellige sammenhæng, og valg af ellagertype kan derfor ikke umiddelbart foretages ud fra prisen pr. lagret energienhed.

6.5. Konsekvensvurdering for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af ellagring

Det danske elforbrug varierer kraftigt såvel over døgnet som over året. For at klare de største spidsbelastninger skal den installerede effekt være væsentlig større, end hvis forbruget var jævnt fordelt.

Hvis der i elsystemet indgår produktionskilder, hvis ydelse varierer på uforudsigelig måde - f.eks. fra time til time eller fra dag til dag - opstår forskellige tekniske problemer ved sammenkøringen med det øvrige produktionssystem. Dette har dels et teknologisk aspekt dels et økonomisk, idet den økonomiske værdi af produktionen fra den nye energikilde til en vis grad vil afhænge af, hvor godt det lykkes at løse indpasningsproblemerne teknisk set.

Den igangværende udbygning med vindkraft betyder, at en stadig større del af elproduktionen varierer. Endvidere medfører flere decentrale kraftvarmeværker samt miljøanlæg på eksisterende kraftværker, at reguleringsmulighederne begrænses.

Problemet kan afhjælpes ved etablering af fleksible elbelastninger eller ved indførelse af ellagre i nettet. De mest relevante muligheder for lagring i et stort elproduktionssystem vil være de her omtalte teknologier.

For danske forhold vil sandsynligvis højst 2 pumpekraftværker blive aktuelle, terrænforholdene taget i betragtning. Ved at træffe aftaler med udlandet (Norge, Sverige), som disponerer

over vandkraftmagasiner, kan imidlertid opnås samme effekt som af et lokalt pumpekraftværk, dog afhængig af årstiden. Der foreligger allerede i dag en aftale af denne art med Norge, som gør det muligt at trække effekt fra Norge i spidslastperioderne om dagen mod tilbagelevering af energien om natten.

Trykluftkraftværker har tidligere været overvejet her i landet, men er blevet mindre interessante med stigende priser for brændsel til gasturbiner.

Lagring i batterier eller superledere ligger af økonomiske grunde noget længere ud i fremtiden. Betingelserne for, at batterilagring kan blive økonomisk, er bl.a. at der er store døgnvariationer og udprægede "spidser" hele året (således at man når op på et stort antal af opladninger pr. år), samt at der er forskel på de marginale produktionsomkostninger om natten og om dagen, svarende til f.eks. kulkraft og oliefyrede værker. Endvidere at man befinder sig i områder, hvor billigere løsninger som pumpekraft- eller luftmagasinværker ikke kan realiseres. Batterierne og tilhørende omformere kan eventuelt placeres i mindre enheder ude i nettene for derved ud over besparelserne i produktionssystemet at opnå besparelser på netudbygning og -tab. Batterier kan bygges i små størrelser, kan indpasses på steder, hvor andre anlæg er miljømæssigt uacceptable, og har gode reguleringsgenskaber.

Der foregår i øjeblikket en udbygning med kraft/varmeproduktion. Af hensyn til lastfordeling på elsidén må en afpasning af forholdet mellem varme og elproduktion derfor etableres i det enkelte varmforsyningsområde, f.eks. ved etablering af korttidsvarmelagre, som kan bygges billigere end en ækvivalent udbygning af elsidén.

6.6. Industripolitiske aspekter

Ellagring er en teknologi, der endnu ikke er kommerciel tilgængelig i stor skala, med undtagelse af pumpekraftværker, der er kommercielt tilgængelige i udlandet. Hvis opførelse af et sådant værk bliver aktuel i Danmark, vil man derfor trække på udenlandsk ekspertise. Trykluftkraftværker bliver af økonomiske grunde næppe aktuelle i Danmark.

Hvad derimod angår svinghjul, superledende magneter og batterier, er Danmark på forkant med forskningen, men absolut ikke førende. Der vil derfor næppe fremkomme nogen eksport fra Danmark i forbindelse med ellagringsteknologierne. Teknologien vil næppe heller ændre beskæftigelsessituationen.

6.7. Fremtidig forskning og udvikling

Pumpekraftværk

I løbet af de sidste 20 år er der på verdensplan opført pumpekraftværker med en samlet effekt på 2-3000 MW pr. år.

Pumpekraftværker er således i dag en kendt teknologi med en god virkningsgrad. Der vil dog i fremtiden kunne opstå pladsmæssige problemer med at udbygge med pumpekraftværker, idet bassinerne er meget pladskrævende. Det kan derfor blive aktuelt at udnytte undergrunden, således at det nedre bassin bliver et underjordisk magasin. Herved kan store højdeforskelle opnås, og den potentielle energi kan udnyttes bedre. Sådanne underjordiske systemer er under udvikling, men der mangler endnu detaljerede undersøgelser og projektering, inden et forsøgsanlæg kan opføres.

Trykluftkraftværk

Der er endnu kun opført ét trykluftkraftværk i udlandet, og der bør derfor opbygges flere demonstrationsanlæg. Videreudvikling i opbygning og design kan medføre lavere etableringsomkostninger.

Svinghjul

Svinghjulslagring har i dag størst anvendelighed i maskiner, som omdanner en frem- eller tilbagegående bevægelse til rotation, f.eks.: eksplosionsmotorer. Dette er en form for korttidslagring af energi.

For at udnytte svinghjulet som energilager f.eks. i forbindelse med belastningsudjævning i elnettet, kræves imidlertid en kraftig udvikling. Der forskes derfor nu i at finde egnede materialer til svinghjulene. Materialerne skal have stor styrke. Dette muliggør lagring af meget store energimængder pr. masseenhed, uden at svinghjulet går i stykker.

Superledning

Superledende magnetiske energilagere (SMES) har med den høje effektivitet og hurtige reaktion mulighed for at blive et meget attraktivt elenergilager til elnettet. For at dette kan opnås, kræves der udvikling indenfor detailprojekteringen, og der kræves forsøgsopbygninger og -afprøvninger. Det kan forventes, at superledende ellagre er anvendelige i elnettet i USA omkring år 2000.

Batterier

Nye typer af batterier med høj energitæthed er under udvikling i laboratorierne verden over. I de senere år har der specielt været en koncentreret indsats på udvikling af lithium batterier, men også på forskning og udvikling af natrium batterier ofres der store ressourcer. Desuden videreudvikles de gammelkendte systemer, ikke mindst blyakkumulatorer.

Udviklingen af faststof batterier er et aktivt forskningsområde. Faststofbatterierne er meget attraktive på grund af deres høje energitæthed.

Den videre forskning og udvikling bør for såvel faststof- som

flydende batterier rettes mod en forbedring af det antal cykler, som kan opnås inden for levetiden. Hvis antallet af cykler for batterierne stiger, kan dette medføre en større anvendelighed af batterierne. Kan der således iværksættes en masseproduktion, vil omkostningerne automatisk falde.

Udviklingen af faststofbatterier skal yderligere gå mod en højere effekttæthed og endnu højere energitæthed.

6.8. Datablad

Datablad for ellagring indgår under kapitel 4 vedrørende bølgeenergi, da ellagring ikke indgår som en selvstændig teknologi i scenariemodellen.

7. BRINTTEKNOLOGI

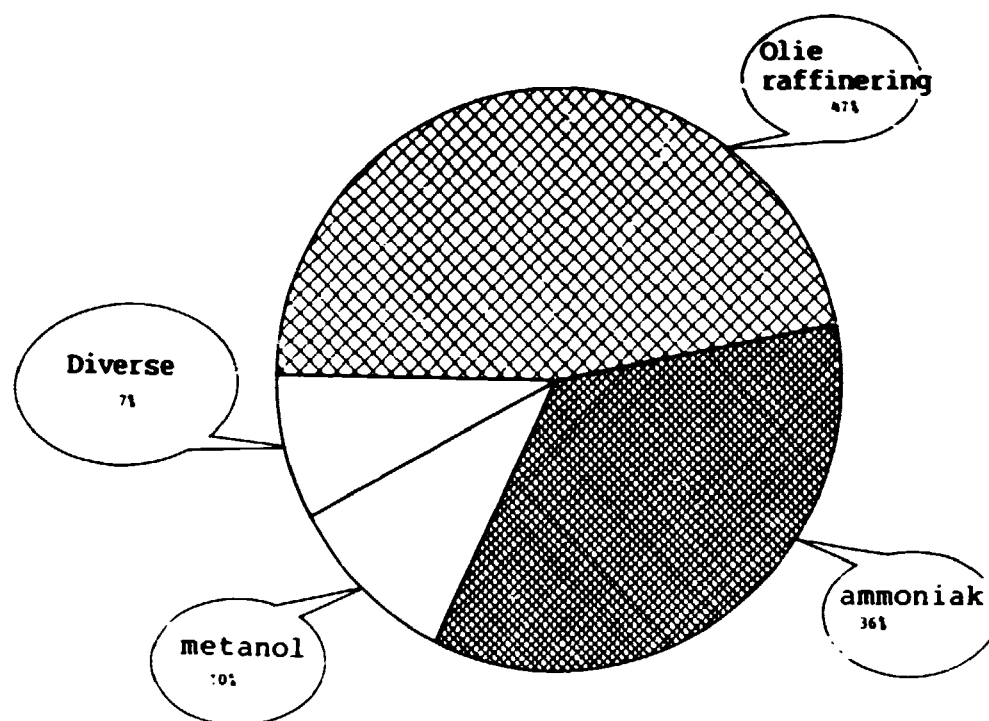
7.1. Teknologisk udvikling samt fremtidig vurdering

Brint er - omend i lille målestok - blevet benyttet siden slutningen af 1700-tallet, hvor man anvendte den som opdriftsmedium i balloner. Fra slutningen af 1800-tallet begyndte man også at bygge luftskibe, hvortil der ligeledes anvendtes brint. Med Hindenburg-katastrofen i 1937 svandt imidlertid interessen for dette opdriftsmiddel.

Også i slutningen af 1700-tallet begyndte man at anvende brintholdige gasser til belysning. I 1800-tallet blev der bygget mange gasværker, som leverede bygas til belysning og opvarmning. Denne bygas, som i det væsentlige bestod af kulilte og brint, blev lavet på basis af kul.

Omkring år 1900 begyndte man at anvende brint i den kemiske industri. Denne anvendelse er nu den vigtigste. Siden 1960-erne har man endvidere anvendt flydende brint som raketbrændstof.

Da en væsentlig del af den producerede brint ikke kommer ud i handelen, men anvendes direkte hos producenten, er det meget svært at lave en nøjagtig statistik over de producerede mængder. En opgørelse viser, at verdens samlede brintproduktion i 1986 var ca. 42 Mt med et energiindhold på ca. 5000 PJ, svarende til ca. 1,6% af verdens energiforbrug. Kun ca. 20% af brinten anvendes imidlertid til energiprodukter, mest hydrering af fossile brændsler. I langt mindre grad bruges der brint i brændselsceller (pilotanlæg i Japan, USA, Belgien og Tyskland), ligesom der også udføres praktiske forsøg med anvendelse i forbrændingsmotorer i biler. Endelig har brint en speciel anvendelse som raketbrændstof. Cirka 80% af brinten anvendes i den kemiske industri først og fremmest til fremstilling af ammoniak og metanol. Figur 7.1 viser, hvor store andele brint der bruges til de forskellige formål.



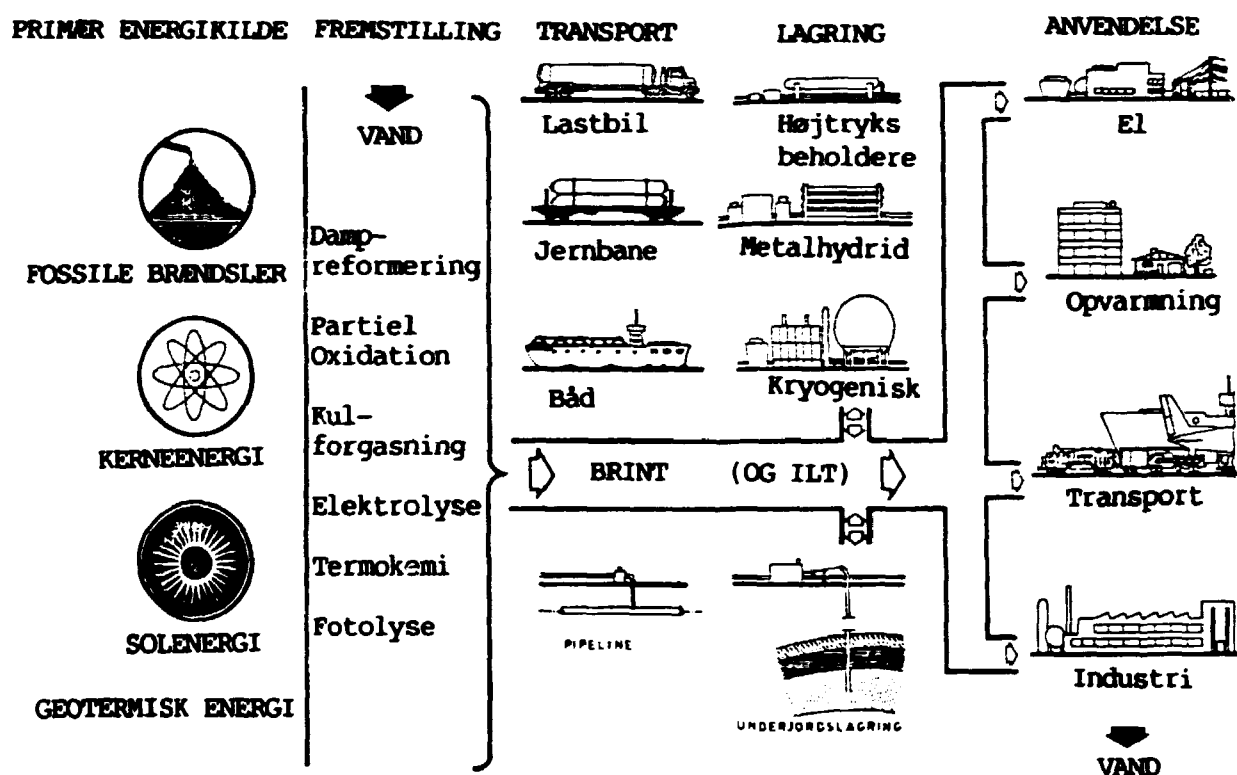
Figur 7.1. Anvendelse af brint

De ikke-energimæssige anvendelser af brint vil dominere langt ind i næste århundrede. Man kan forvente et voksende forbrug såvel til produktion af kunstgødning som i olieindustrien. I de kommende årtier vil brint eventuelt finde anvendelse i forbindelse med brændselsceller. Desuden vil man måske se brint anvendt ved spidslast eller reserveproduktion på damp- og gasturbiner. Endvidere vil brint muligvis blive brugt som drivmiddel ved vej- og jernbanetransport. Anvendelse i stor skala af brint som energibærer kan tidligst blive aktuel et godt stykke ind i næste århundrede.

Råvarerne til brintfremstilling vil fortsat være naturgas og olie. På langt sigt vil mangel på disse energikilder samt udviklingen af nye kulforgasningsteknikker sandsynligvis medføre, at man vil skifte over til produktion baseret på kul. Hvis man på langt sigt i dansk sammenhæng forestiller sig brint anvendt som afløser for naturgassen og/eller som lagringsmedium i forbindelse med en kraftig udbygning med solceller, vindkraft eller

bølgeenergi, kan elektrolytisk brintfremstilling få en fremtrædende rolle. Denne fremstillingsmetode vil også blive aktuel, hvis fusionsenergi introduceres.

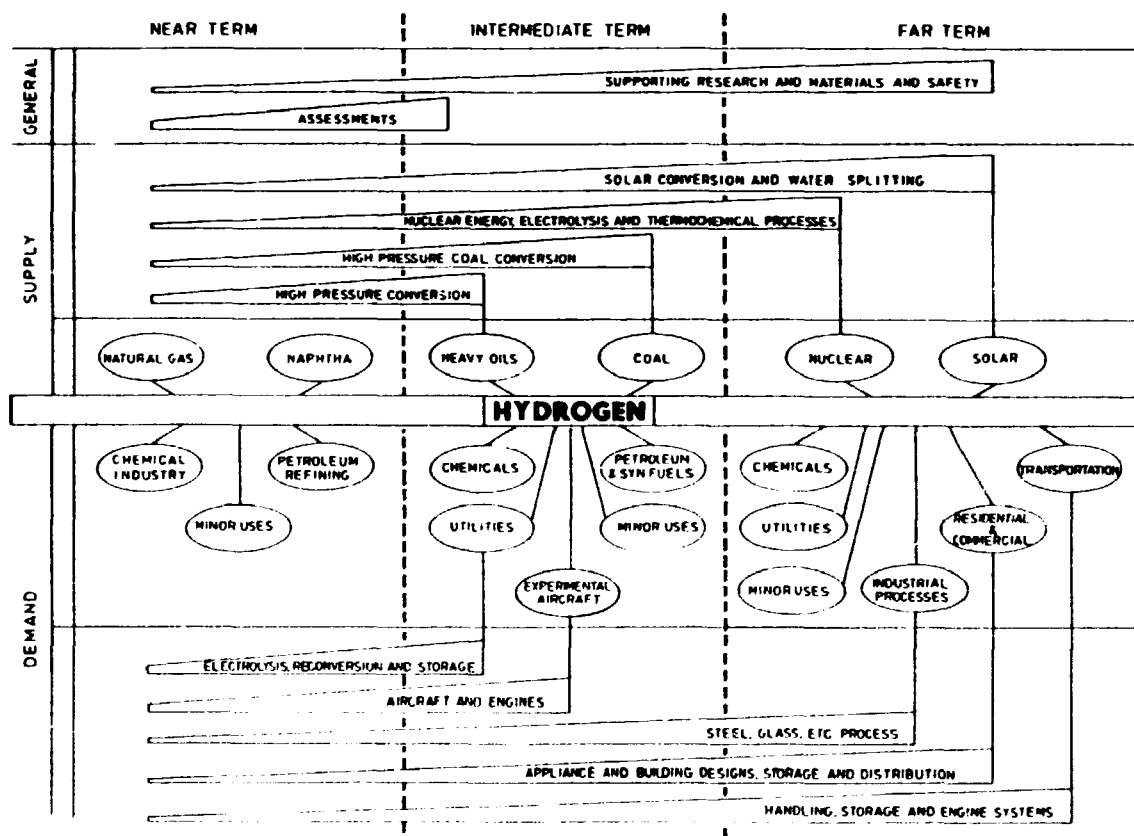
Figur 7.2 giver en oversigt over forventede anvendelsesområder og produktionsmetoder for brint på verdensplan, mens figur 7.3 skematisk viser sammensætningen af et brintenergisystem.



Figur 7.2. Forventede anvendelsesområder og produktionsmetoder for brint

Det er på verdensplan teknisk og ressourcemæssigt muligt at producere meget store mængder brint ved elektrolyse baseret på elektricitet fra solceller. En tysk undersøgelse viser, at der findes ca. 600.000 km² uudnyttet ørken med en totalstråling på over 2300 kWh/(m²·år), og yderligere 1.300.000 km² med over 2000

kWh/(m²·år). Det vurderes, at områderne med over 2300 kWh/(m²·år) udgør et brintproduktionspotential på ca. 1700 t/(km²·år) eller i alt 1025 Mt/år med et energiindhold på 123.000 PJ/år. Til sammenligning kan anføres, at verdens nuværende energi- og brintforbrug er ca. 310.000 PJ/år, hhv. 42 Mt/år.



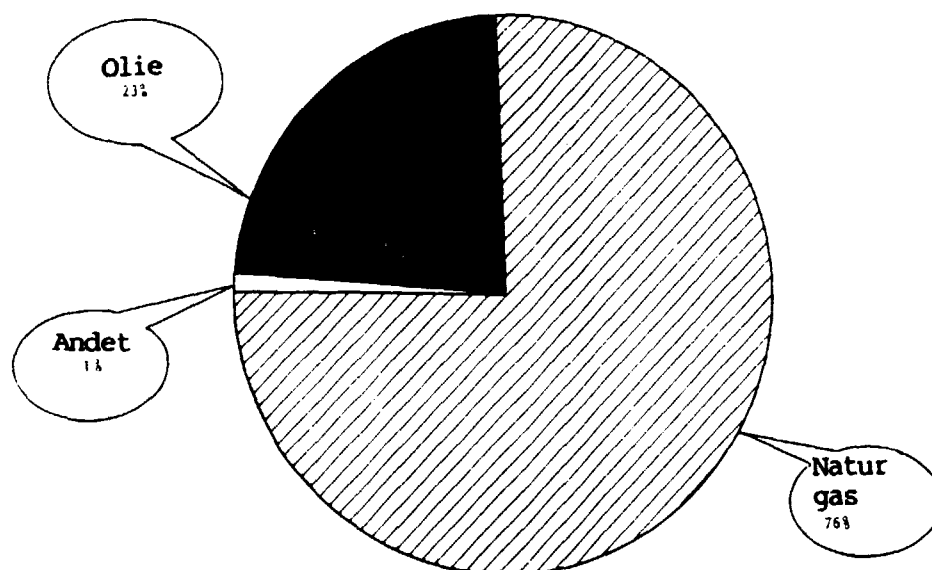
Figur 7.3. Brintenergisystem

Produktion af brint

Brint kan fremstilles på mange måder. Ved enhver brintproduktion kræves der to ting: et brintholdigt stof (kulbrinter eller vand) og energi (bundet i kul eller kulbrinter eller i form af elektricitet). I dag produceres langt den meste brint ved de følgende metoder, som er opstillet i en rækkefølge med de mest anvendte processer først:

- steam reforming af naturgas
- partiel oxidation af tunge kulbrinter
- kulforgasning
- elektrolyse af vand.

Praktisk taget al brint fremstilles ud fra fossile brændsler. Kun ca. 0,5% fremstilles ved elektrolyse af vand. Figur 7.4 viser, hvorledes brintfremstillingen er fordelt på de forskellige råvarer.



Figur 7.4. Råvarer ved brintproduktion

Brint fremstillet ved elektrolyse er meget rent men i blanding med vanddamp, hvorimod brint produceret ved de andre processer forekommer i en blanding med andre gasser. Derfor kræves en separationsproces, før man har den rene brint.

Udover de nævnte industrielle processer til brintfremstilling kan man også benytte termolyse, fotolyse og radiolyse, men ingen af disse processer anvendes i særlig stor udstrækning.

Lagring og transport af brint

Ved en atmosfæres tryk fortættes brint til en væske ved en temperatur på 20 K (-253°C). Under 14 K (-259°C) overgår den til fast form. Rent brint lagres og transporteres langt overvejende i form af gas og væske. Herudover kan brint også oplagres i metalhydridler.

Store lagre kan med dagens teknik udføres som tryktanke og undergrundslagre (kaverne) for gasformig brint. Det vil ligeledes være muligt at benytte store lagre for flydende brint (-253°C). Små brintlagre kan udføres som trykbeholdere for gasformig brint eller beholdere med flydende brint. Metalhydridler udgør et lovende alternativ som lagringsmedium. Metalhydridernes største fordele udgøres af deres store energitæthed og sikkerhed.

Udover ovennævnte fremgangsmåder kan man også lagre og transportere brint i anden kemisk bunden form (ammoniak, metanol m.m.).

Med hensyn til transport af brint anvender man i dag rørtransport og bil/tog/skibstransport af flydende og gasformigt brint.

7.2. Energiforhold

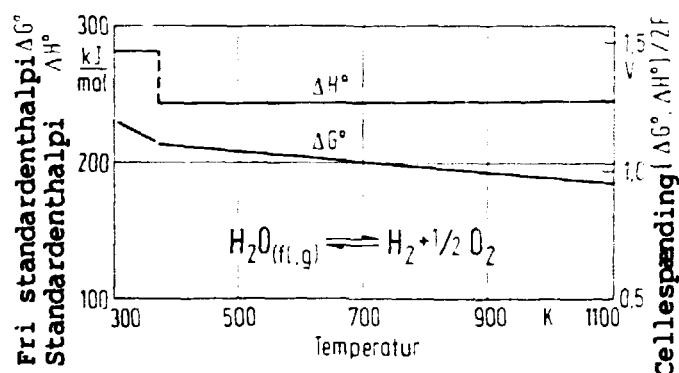
Produktion

Produktion af brint sker i dag som tidligere nævnt hovedsageligt ud fra kul og kulbrinter. I den første tabel i afsnit 7.4 er virkningsgraden for disse metoder angivet. For danske forhold vil elektrolysemetoden være interessant, idet brinten kan forventes produceret ud fra vedvarende energikilder.

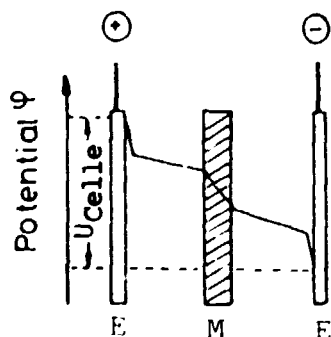
Som ved enhver anden teknisk proces vil der ved fremstilling af brint uundgåeligt optræde energitab. I det følgende vil de faktorer, som har særlig betydning for virkningsgraden, blive gennemgået. Idet især elektrolysemetoden har interesse, fordi den

er velegnet til at transformere og lagre energi indvundet ved stokastisk fordelt produktion, som f.eks. vind-, sol- og bølgeenergi, og derved er (næsten) miljømæssig neutral, vil kun denne metode blive behandlet i det følgende.

Den teoretiske celledspænding i et ilt/brint batteri ved 25°C og 1 bar er ca. 1,2 volt, faldende med stigende temperatur til ca. 0,9 volt ved 900°C, se figur 7.5. Dette forløb antyder, at det kan betale sig at tilføre en del af spaltningsenergien i form af procesvarme, som ofte er billigere end elektricitet. Imidlertid vil der i praksis være et yderligere strømafhængigt spændingsfald, som antydnet på figur 7.6. Derfor er cellens virkningsgrad strømafhængig på grund af bl.a. ohmske modstande i elektrolyt og membran og ligger omkring 60%, svarende til ca. 4,5 kWh/m³ H₂.



Figur 7.5. Celledspænding og enthalpi som funktion af temperaturen



Figur 7.6. Skematisk fremstilling af potentialforløbet i en elektrolysecelle, hvor E er elektroderne, og M er membran

Man søger derfor at udvikle membraner med meget ringe modstand, samtidig med at afstanden mellem elektroderne søges nedbragt (afstandsløs cellegeometri). Det er allerede lykkedes at fremstille sådanne membraner af såvel organiske polymerer, indtil videre dog kun for relativt lave temperaturer, 70-90°C, som af keramisk materiale for driftstemperaturer omkring 900°C.

Herudover foregår der en udvikling af bedre anode- og katodematerialer for at nedsætte spændingsspringet (overspændingen) ved elektrodeoverfladerne. Valget kan gå i retning af specielle legeringer og udformninger, men i mange tilfælde mødes problemer i form af manglende langtidsstabilitet og korrosionsfasthed, såvel kemisk som elektrokemisk, idet elektrolytten - ofte KOH - er forholdsvis aggressiv.

Lagring og transport

Som nævnt er der tre tilstandsformer, hvorunder brint kan lagres til senere brug

- som en komprimeret luftart
- som en afkølet væske
- som en kemisk forbindelse, som f.eks. et metalhydrid.

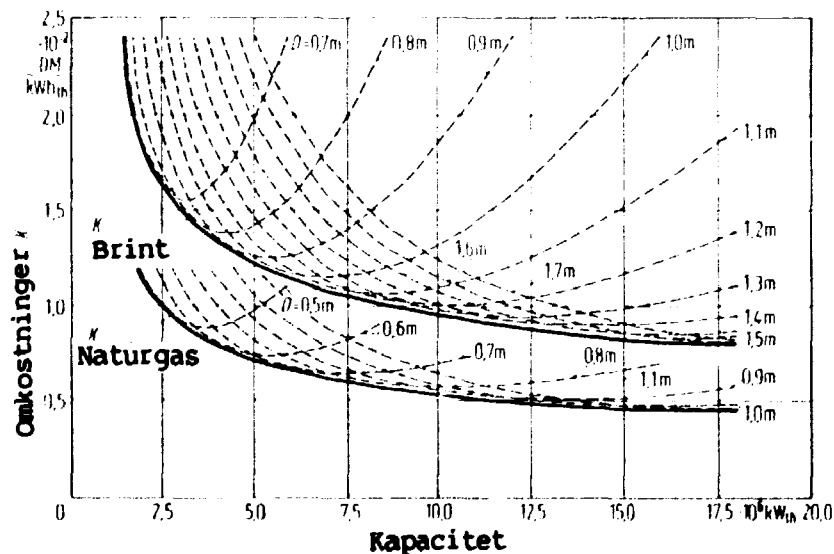
Hver form har sine fordele, afhængigt af den måde brinten skal benyttes på, men i alle tilfælde vil der medgå en vis mængde energi og dermed omkostninger til lagringen. Således kræver lagring under tryk arbejde til komprimeringen, mens lagring i flydende tilstand kræver et kølearbejde til fordråbning af brinten, foruden at der ved denne metode sker en stadig fordampning. Størrelsen afhænger af lagerets udformning, for små lagre typisk 0,1% pr. døgn, og for større lagre langt mindre.

I efterfølgende tabel er vist typiske værdier for lagringsformer, hvor man især kan bemærke, at brint i såvel flydende form som absorberet som hydrid har meget store volumentætheder, mens vægtmæssigt gunstigste form er den flydende tilstand.

Typiske specifikke data for brintlagre

	Brint alene		Beholder inklusive	
	$\text{kg}(\text{H}_2)/\text{kg}$	$\text{kg}(\text{H}_2)/\text{m}^3$	$\text{kg}(\text{H}_2)/\text{kg}$	$\text{kg}(\text{H}_2)/\text{m}^3$
<u>Store lagre</u>				
Underjordiske	-	5-10	-	5-10
Tryktanke	-	2-16	0.01-0.014	2-16
Metalhydrider	0.015-0.017	55-60	0.013-0.015	50-55
Kryoabsorbere	0.055	19	-	-
Flydende brint	-	71	1.0-1.1	65-69
<u>Små lagre</u>				
Tryktanke	-	16	0.012	~ 15
Metalhydrider	0.016	60	0.012-0.014	50-53
Flydende brint	-	71	0.15-0.50	~ 65
<u>Transportformål</u>				
Metalhydrider	-	60	0.018	60
Flydende brint	-	71	0.09-0.13	50-60

For transportens vedkommende, hvad enten den sker i rør eller i tanke, er de energimæssige konsekvenser i det store og hele som ved transport af anden gas. Således vil en typisk værdi for pumpearbejdet i et rør med 1,3 m diameter være ca. $0.015\text{W}/\text{kW}(\text{H}_2)\text{km}$, hvis det er nødvendigt at kompensere for trykfaldet hen langs en rørstrækning. Figur 7.7 viser en sammenligning med naturgas.



Figur 7.7. Sammenligning af transport af hhv. naturgas og brint

7.3. Miljøforhold

Generelt er brint et miljøvenligt alternativ som energibærer, idet emissionerne af skadelige stoffer ved forbrænding af brint er små i forhold til ved konventionelle brændsler.

Når brint anvendes som brændsel i el- og varmeproduktionsprocesser, forbrændingsmotorer m.m., er NO det eneste miljøforurenende element, der fremkommer. Normalt kan NO-indholdet holdes på et lavt niveau. Derudover kan der forekomme en anelse NO₂, men dette sønderdeles dog i almindelighed af lyset og når således ikke at berøre omgivelserne.

Når man derimod ser på brintteknologien i sin helhed, d.v.s. fra fremstilling til anvendelse, er brintteknologien ikke nødvendigvis mere miljøvenlig end andre energiteknologier. Specielt fremstillingsprocessen kan påvirke miljøet, afhængig af hvilken primær energikilde der benyttes til fremstillingen. Således påvirker de konventionelle fremstillingsmetoder som f.eks. steam reforming i høj grad miljøet. Derimod kan nye fremstillingsprocessers indvirkning på miljøet være svære at bedømme. Mange nye fremstillingsprocesser virker som gode alternativer, når der tages hensyn til miljøpåvirkninger, mens andre fremstillingsprocesser virker mere tvivlsomme. Eksempelvis indgår grundstoffer som klor, brom, jod, vanadin, svovl og kviksølv i enkelte foreslåede termokemiske fremstillingsprocesser. Det er hensigten ved disse fremstillingsprocesser, at de kemiske stoffer skal kunne genvindes og føres tilbage til processen, men det kan ikke udelukkes, at der vil forekomme en hel del affald fra store fremstillingsanlæg. Dette affald må derfor viderebehandles.

I et IEA-program vedrørende brint er der i 1980 foretaget en sammenligning af miljøaspekter for forskellige energikilder. Naturgas og brint blev anset for at være de miljømæssigt bedst egnede brændsler til elproduktion. Miljøeffekterne ved naturgas og brint blev forbrændingsmæssigt vurderet ens. Emissionen af kuldioxid er naturligvis nul for brintforbrænding.

Bedømmelse af miljøeffekter som her nævnt kan være forbundet med vanskeligheder, idet der må gøres en del antagelser og relevante vurderinger på et spinkelt grundlag. Derudover er det svært at tage hensyn til alle parametre.

Forbrænding af fossile brændsler påvirker i høj grad kuldioxid-indholdet i luften, og det er ikke usandsynligt, at dette kan blive den største drivkraft for et fremtidigt brintsamfund, der evt. baseres på vedvarende energi eller fusion.

Der kan være risiko for eksplosion ved benyttelse af brint, og man skal derfor være meget påpasselig ved komponent- og systemudformningen samt under drift.

Blandinger af brint og luft eller ilt er letantændelige. En eksplosion kan opstå blot ved meget ringe energitilførsel, omkring en tiendedel af hvad der kræves for at antænde en benzinluft-blanding. Ved atmosfæretryk kræves temperaturer over 585°C for antændelse af brinten, men ved et tryk på 0,2-0,5 atm. sker antændelse ved ca. 390°C. Brint brænder med en farveløs flamme. Ved forbrænding i ren ilt dannes der kun vand. Der dannes imidlertid altid mindre mængder af kvælstofoxider ved forbrænding i luft.

Brints påvirkning af visse metaller og metallegeringer, såkaldt brintsprødhed og brintsyge, er ligeledes fænomener, der er af interesse fra et sikkerhedsmæssigt synspunkt. Af faktorer, der indvirker i denne sammenhæng, kan nævnes brintkoncentrationer, tryk, temperatur, brintrenhed, materialets sammensætning og styrke, kornstørrelse, mikrostruktur og varmebehandling.

To forhold, der specielt er afgørende i forbindelse med brintsprødhed, er blæredannelse og sprækkedannelse. Blæredannelsen opstår ved brintatomernes hurtige diffusion gennem forskellige metalstrukturer. Ved korngrænser og i vacancer forenes brint-

atomer til brintmolekyler. Disse diffunderer ikke gennem metalstrukturer, men bygger derimod et tryk op, som resulterer i mekanisk brud. Sprækkedannelsen er imidlertid et ydre fænomen, idet sprækker dannes på ydersiden af metallet. Plastisk deformation kan beskytte mod sprækkedannelsen, men tilstedeværelsen af blot små mængder ilt eliminerer helt denne form for beskyttelse.

7.4. Økonomi

Produktionsforhold

Produktion af brint sker som nævnt i dag hovedsageligt ud fra kul og kulbrinter. De økonomiske forhold ved disse metoder, som er velindarbejdede, fremgår af nedenstående tabel.

Termisk virkningsgrad, investeringer og omkostninger
ved brintfremstilling på grundlag af fossile råstoffer

	Termisk virknings- grad	Råstofpris	Anlægsom- kostning ^{a)} kr./GJ	Totale omkostninger kr./GJ
Naturgas	0.74	46 kr./GJ	16	84
Brunkul	0.52	123 kr./t	43	85
Lette kulbrinter	0.73	2890 kr./t	17	116
Tung olie	0.60	1810 kr./t	31	114
Stenkul	0.54	947 kr./t	42	108

a) Kapitalomkostning inkl. vedligeholdelse etc. sat til 30% p.a.

Produktion af brint ved hjælp af elektrolyse, der formentlig bliver den form, som på langt sigt kunne blive interessant for danske forhold, belastes dels af investeringer, dels af drifts-

omkostninger, som er velkendte i dag, om ikke under danske, så dog under europæiske forhold.

En fordel ved brintproduktionsanlæg ved elektrolyse er, at de naturligt opbygges i moduler, f.eks. med produktioner i området 200-1000 m³/h, hvilket letter såvel fremstilling af anlæggene som tilpasning af anlægsstørrelsen til behovet.

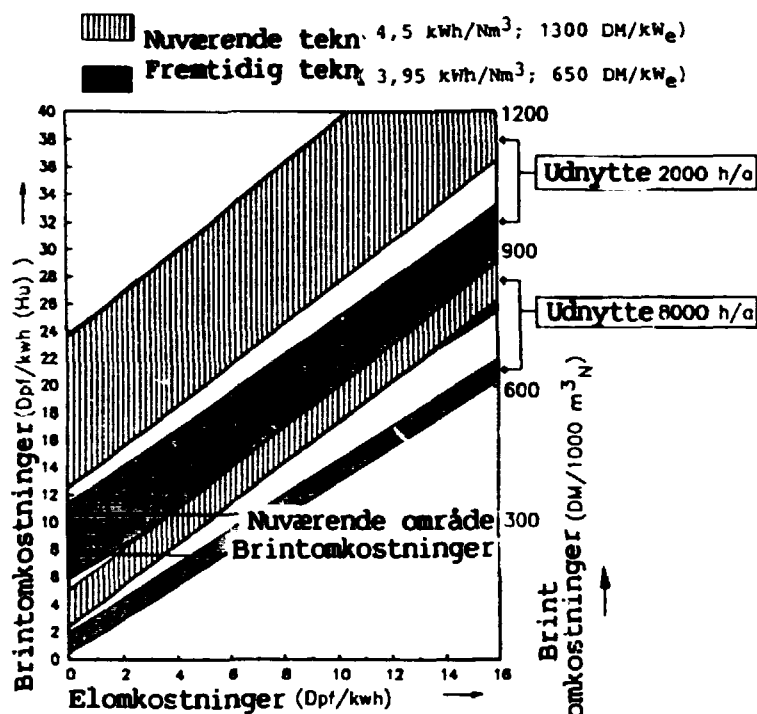
Investeringer afhænger naturligvis af anlægsstørrelsen og vil for anlæg på ca. 150 MW_e være ca. 6000 kr./kW. Drifts- og vedligeholdelsesomkostninger omfatter bl.a. fornyelse af elektroder, drift af pumper, råvand, rensningsanlæg, kemikalier, m.v., og sættes til ca. 2-4% årligt af anlægsomkostningerne.

Idet der her ikke skal fokuseres på den måde, hvorpå strømmen er produceret, og dermed dens pris, men hovedsageligt på brintproduktionen, giver figur 7.8 et ganske godt overblik over det nutidige stade. Specielt understreger denne figur, hvor væsentlig benyttelsestiden er for produktprisen. Hvis brintproduktionen skal benyttes til at optage den tilfældige, overskydende produktion fra sol- vind- eller bølgekraft, må man formentlig forvente en benyttelsestid omkring 2-3000 timer pr. år.

Transport

Da der i dag kun finder en ringe transport af brint sted, er der kun få oplysninger til rådighed. Imidlertid kan man antage, at omkostningerne ved transport i beholdere - tryksat eller afkølet - kan sammenlignes med transport af andre luftarter, idet man bl.a. kan sammenligne med transport af LNG etc. Således transporteres LNG i flydende form i tankskibe.

Omstående tabel giver eksempel på omkostningsforholdene for forskellige former for brinttransport.



Figur 7.8. Et eksempel på omkostninger ved fremstilling af brint ved elektrolyse. Her er anvendt afskrivningstid på 6 år (den øvre begrænsning) og 20 år (den nedre begrænsning). Endvidere er anvendt 8% rente, og driftsomkostninger pr. år er sat til 4% af investeringerne.

Et eksempel på transportomkostninger for brint

Transportmiddel	Specifikke omkostninger	
	kr./((kg(H ₂))·km)	kr./kg(H ₂)
Overregional rørført gas	(5- 14) ·10 ⁻⁴	
Søledninger	(20-115) ·10 ⁻⁴	
Skibe, flydende H ₂	(10- 13) ·10 ⁻⁴	0.20
Tog, flydende H ₂	(31- 77) ·10 ⁻⁴	0.30
Vej, flydende H ₂	(62- 81) ·10 ⁻⁴	0.33
Distribution, flydende H ₂	(200-770) ·10 ⁻⁴	0.10
Regionalt rørført gas	(12- 31) ·10 ⁻⁴	
Tog, gasformigt H ₂	(310-350) ·10 ⁻⁴	1.75
Vej, gasformigt H ₂	(425-770) ·10 ⁻⁴	1.75

7.5. Konsekvenser for det samlede el- og energisystem ved benyttelse af brint som energibærer

Brint som et energibærende medium kan i fremtiden få to hovedanvendelser:

- som lagringsmedium
- som substitution for naturgas.

Anvendelse af brint som lagringsmedium for energi vil umiddelbart svække den ellers stærke binding mellem produktion og efterspørgsel efter elektricitet, som specielt ved introduktion af store andele af elektricitet frembragt ved hjælp af ukontrollerbare kilder som sol, vind og bølger kunne blive et problem. I modsat fald måtte man enten foretage regulering af de konventionelle produktionsenheder med slid og tab til følge eller afsætte overproduktionen på en anden - måske knapt så hensigtsmæssig - måde, f.eks. i elektrokedler.

Den oplagrede brint kunne sidenhen bruges enten i gasturbiner, brændselsceller eller som et kemisk råstof.

Den anden hovedanvendelse af brint kunne være som substitution for naturgas, idet der jo er begrænsede ressourcer til rådhed. En grund til at substituere naturgassen er stadig at kunne forsyne de mange aftagere, som nu helt er afhængige af gassen. Denne brint kunne tænkes fremstillet på grundlag af kulforgasning, idet der er væsentlig mere kul end naturgas til rådhed, men dette har naturligvis visse miljømæssige konsekvenser. Desuden vil hele transmissions- og distributionssystemet skulle gennemgås for at tilpasse systemet til brinholdigt gas, der som tidligere nævnt kan have visse uheldige påvirkninger af stål.

7.6. Industripolitiske aspekter

Brintteknologi under danske forhold med brinten som energibærer i større udstrækning vil formentlig tidligst finde sted længe efter år 2000.

Der foregår allerede en vis forskning i Danmark, hvis resultater kan finde anvendelse på dette område, f.eks. vedrørende brint-lagring. Hvis det bliver aktuelt at producere, transportere og bruge brint, vil der derfor være en viden at trække på. Derfor vil den danske industri kunne tilpasse sig dette område, så meget mere som mange enheder - f.eks. apparatur til fremstilling af brint ved elektrolyse - er modulært opbygget og derfor egnede for produktion i mindre enheder.

Dette kunne medføre en eksport af viden og apparatur til andre lande, f.eks. sådanne som er karakteriseret ved mangel på konventionelle råstoffer, men med rigelige ressourcer af vedvarende energi, f.eks. solenergi. På denne måde kunne miljøet skånes ved at bruge solen som kilde til energikrævende processer via brinten.

7.7. Fremtidig forskning og udvikling

Der foregår et stort forsknings- og udviklingsarbejde i en række lande med henblik på at udnytte brint i energisammenhæng. Indsatsen er dog mindre på nuværende tidspunkt end i perioden fra midten af 70'erne til begyndelsen af 80'erne. Nationer som USA, Canada, Vesttyskland, Japan, Belgien og Frankrig indtager fremtrædende positioner inden for brintforskningen. Danmark og Sverige er ligeledes aktive på området. I de seneste år er der yderligere sket en mærkbar øget forskningsinteresse fra lande i den tredje verden.

Saudiarabien har således indgået et samarbejde med Vesttyskland i et projekt med brintfremstilling baseret på solenergi. I Kina følger fremstillingen og anvendelsen af brint stort set det samme mønster som den vestlige verdens. 98% af den producerede brint anvendes her til ammoniakfremstilling. Også Brasilien har interesse i at benytte brint som energibærer, idet man søger at reducere olieimporten. Brasilien har det næststørste vandkraft-potentiale i verden.

Det forsknings- og udviklingsarbejde, der indtil nu har fundet

sted, har stort set omhandlet hele området vedrørende brintteknologien. Hovedområdet for forskning og udvikling har tidligere været produktionsområdet, men de senere år har udviklingen ændret sig således, at forskningen først og fremmest tager sigte mod nye anvendelsesmuligheder for brint.

Følgende områder anses for nøgleområder for forskning, udvikling og demonstration med henblik på videreudvikling af brintteknologien:

Produktion af brint ved sønderdeling af vand:

- Forbedring af virkningsgrad, økonomi og pålidelighed ved avanceret elektrolyse (alkalisk, middeltemperaturelektrolyse og elektrolyse ved fast polymerelektrolyt (SPE)).
- Demonstration af højeffektivelektrolyse (højtemperatur og dampelektrolyse).
- Demonstration og pilot test af elektrolysesystem med fluktuierende primær energikilde.

Kondensering:

- Forbedring af virkningsgrad ved kondenseringsanlæg (45-50% Carnotvirkningsgrad); udvikling af termomagnetisk køleproces.

Transport, lagring og distribution:

- Udvikling af brintkompressor i stor skala.
- Demonstration af effektiv lagring i stor skala (> 3,5 TJ).
- Demonstration i stor skala af komponenters brugbarhed (undergrundslagring, transmissions- og distributionsnet samt ventiler).

Anvendelse:

- Teknik til brintanvendelse; demonstration (dampgeneratorer, katalytiske brændere); virkningsgrad; længere levetid; lavere omkostninger.

- Brintmotorer.
- Konventionel teknik; modificering af naturgasnettet til brint-anvendelse (flammebrændere, forbrændingsmotorer, turbiner).
- Udvikling af H_2/O_2 -energisystem til rumfartsformål.
- Demonstration af sikkerhed.

Benyttelse af brint som energibærer forudsætter ikke nogen gennemgribende teknisk nyudvikling, idet den nuværende teknik kan videreudvikles. Målsætningen er at forbedre tilgængelighed og effektivitet samt at mindske investeringsomkostningerne.

Udvikling af fremstillingsmetoder påvirkes i høj grad af valget af energikilde. Alt peger på en videreudvikling og forbedring, når det gælder elektrolyse, kulforgasnings- og rensningsmetoder. Forskning og udvikling med termokemiske processer og hybridprocesser er ikke mere så intensiv, som den har været. Disse fremstillingsmetoder kan ligesom de fotolytiske tidligst blive kommercielt tilgængelige et godt stykke efter år 2000.

Med hensyn til lagring og transport vil den nuværende teknik kunne videreudvikles. Erfaringer indhentet fra naturgasområdet vil kunne udnyttes. Ligeledes må det formodes, at den teknik og det system, som i dag findes til naturgas, vil blive udnyttet så langt som muligt.

7.8. Datablad

Der foreligger intet datablad, da brintteknologien ikke forudses anvendt i scenariemodellen.

REFERENCER

Forsyningskataloget 1988.

Alternativ energiforsyning, Det kgl. danske landhusholdnings-selskab, 1986, ISBN 87-7026-266-7.

Den teknologiske udvikling og dennes betydning for udformningen af det fremtidige energisystem, Risø, 1984, ISBN 87-550-1004-0.

Oliefyringsteknik, Teknologisk Institut, 1983, ISBN 87-7511-390-2.

Energilagring i undergrunden, Nordisk Ministerråd 1987, ISBN 87-88217-67-1.

Forundersøgelse til etablering af forsøgsvarmelager som bore-hulslager, Lab. for Varmeisolering, DTH, 1988.

Pumpekraftværker i Danmark, Cowiconsult, Lab. for Energiteknik, DTH, 1988.

Energihåndbogen, Organisationen for Vedvarende Energi, 1981, ISBN 87-87660-229.

Introduktion og markedsføring af nye energiteknologier, Nordisk Ministerråd, 1984.

Projektering af et bølgekraftværk, B. Højlund Rasmussen, 1988.

Bygning og afprøvning af en 1 kW-bølgeenergimaskine, Kim Nielsen, 1984.

Fagbevægelsens muligheder for at fremme udnyttelsen af solenergi, Cenergia, 1988.

Environmental impact and economic prospects of nuclear fusion, Commission of the European Communities Directorate General XII, 1986.

Advanced batteries for energy storage, BHRA Fluid Engineering, U.K., 1981.

Energy Storage Systems, Birol Kilkis and Sadik Kakac, 1988, ISBN 0-7923-0209-5.

Vätgas, en framtida energibärare. Carl-Johan Österberg. Energiforskningsnämnden, Efn-rapport nr. 25. Stockholm, mars 1987.

Hydrogen production and technology: Today, tomorrow and beyond. W. Balthasar. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 9, No. 8, pp 649-668, 1984.

Wasserstoff als Energieträger. C-J Winter und J. Nitsch, Berlin 1986.

Wasserstoff-Energietechnik, WDI Berichte 602, Düsseldorf 1987.

Title and author(s) TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION OF ELECTRICITY OR HEAT (in Danish) Lotte Schleisner	Date March 1990
	Department or group Systems Analysis Department Energy Systems Group
	Groups own registration number(s) 4434847-89-0-002
	Project/contract no. ENS-J.no. 83401-2
Pages 170 Tables 32 Illustrations 31 References 19	ISBN 87-550-1655-3
Abstract (Max. 2000 char.) In connection with the production of "Energi 2000 - Handlingsplan for en bæredygtig udvikling" (Energy 2000 - Plan of Management for a Sustainable Development) a summary and evaluation of various electric power and heat production technologies was produced. Technologies in relation to fusion, wind energy, solar energy, wave energy, heat storage, electric power storage and hydrogen are dealt with. In each case a description of the technological development in the relevant field, also in relation to long (2030), middle (2015) and short term (2000) commercial aspects, is given. The technology is also explained in relation to energy and socio-economical aspects. The consequences of the utilization of the mentioned technologies with regard to the total energy and electric power systems and aspects of Danish industrial policy are considered. Suggestions are presented as to future subjects for research and development in relation to each technology. A number of these technologies are not yet used commercially. The descriptions are thus given on the basis of development on a global basis.	
Descriptors - INIS: COMMERCIALIZATION; DENMARK; ECONOMICS; ENERGY POLICY; ENERGY STORAGE; ENVIRONMENTAL IMPACTS; FORECASTING; HYDROGEN; INFORMATION NEEDS; SOLAR ENERGY; THERMONUCLEAR POWER PLANTS; WAVE ENERGY; WIND POWER Available on request from Riso Library, Riso National Laboratory, (Riso Bibliotek, Forskningscenter Riso), P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark. Telephone 42 37 12 12, ext. 2268/2269. Telex: 43116, Telefax: 45 76 66 27	

**Rekvireres fra
Risø Bibliotek
Forskningscenter Risø,
Postbox 49, 4000 Roskilde, Danmark
Telefon 42 37 12 12, lokal 2268/2269
Telex 43116, Telefax 46 75 56 27**

**ISBN 87-550-1655-3
ISSN 0418-6435**